

世界知的所有權機關
國際事務局

PCT

特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(51) 国際特許分類6 H01L 33/00, H01S 3/18	A1	(11) 国際公開番号 WO99/46822 (43) 国際公開日 1999年9月16日(16.09.99)
(21) 国際出願番号 PCT/JP99/01140 (22) 国際出願日 1999年3月10日(10.03.99) (30) 優先権データ 特願平10/60233 1998年3月12日(12.03.98) JP 特願平10/161452 1998年5月25日(25.05.98) JP 特願平10/284345 1998年10月6日(06.10.98) JP 特願平10/326281 1998年11月17日(17.11.98) JP 特願平10/348762 1998年12月8日(08.12.98) JP 特願平10/368294 1998年12月25日(25.12.98) JP 特願平11/23048 1999年1月29日(29.01.99) JP 特願平11/23049 1999年1月29日(29.01.99) JP (71) 出願人 日亜化学工業株式会社 (NICHIA CHEMICAL INDUSTRIES, LTD.)(JP/JP) 〒774-8601 徳島県阿南市上中町岡491番地100 Tokushima, (JP) (72) 発明者 谷沢公二(TANIZAWA, Koji) 三谷友次(MITANI, Tomotsugu) 中河義典(NAKAGAWA, Yoshinori) 高木宏典(TAKAGI, Hiironori)		丸居宏充(MARUI, Hiromitsu) 福岡芳克(FUKUDA, Yoshikatsu) 池上武志(IKEGAMI, Takeshi) 〒774-8601 徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化学工業株式会社内 Tokushima, (JP) (74) 代理人 弁理士 青山 稔, 外(AOYAMA, Tamotsu et al.) 〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見1丁目3番7号 IMPビル 青山特許事務所 Osaka, (JP) (81) 指定国 AE, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, UZ, VN, YU, ZW, 欧州特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), ARIPO特許 (GH, GM, KE, LS, MW, SD, SL, SZ, UG, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM) 添付公開書類 国際調査報告書
(54)Title: NITRIDE SEMICONDUCTOR DEVICE (54)発明の名称 窒化物半導体素子 <div data-bbox="560 1276 1166 1696"> </div> (57) Abstract A nitride semiconductor light emitting device comprising an active layer of multiple quantum well structure provided between an n-side region including a plurality of nitride semiconductor layers and a p-side region including a plurality of nitride semiconductor layers, having a light emission output improved by allowing the characteristics of the active layer to exhibit well, and capable of being applied to a wider range of various application products, wherein a multilayer film comprising two nitride layers is formed in at least one of the n- and p-side regions.		

(57)要約

多重量子井戸構造の活性層を用いその特性を十分発揮させることにより、発光出力を向上させ、窒化物半導体発光素子の種々の応用製品の適用範囲の拡大を図るために、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、n側領域又はp側領域の少なくともいずれか一方に、2種類の窒化物半導体膜が積層されてなる多層膜層を形成した。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に掲載されたPCT加盟国を同定するために使用されるコード(参考情報)

AE アラブ首長国連邦	DM ドミニカ	KZ カザフスタン	SD スーダン
AL アルバニア	EE エストニア	LC セントルシア	SE スウェーデン
AM アルメニア	ES スペイン	LI リヒテンシュタイン	SG シンガポール
AT オーストリア	FI フィンランド	LK スリ・ランカ	SI スロヴェニア
AU オーストラリア	FR フランス	LR リベリア	SK スロヴァキア
AZ アゼルバイジャン	GA ガボン	LS レソト	SL シェラ・レオネ
BA ボスニア・ヘルツェゴビナ	GB 英国	LT リトアニア	SN セネガル
BB バルバドス	GD グレナダ	LU ルクセンブルグ	SZ スワジランド
BE ベルギー	GE グルジア	LV ラトヴィア	TD チャード
BF ブルキナ・ファソ	GH ガーナ	MC モナコ	TG トーゴ
BG ブルガリア	GM ガンビア	MD モルドヴァ	TJ タジキスタン
BJ ベナン	GN ギニア	MG マダガスカル	TZ タンザニア
BR ブラジル	GW ギニア・ビサウ	MK マケドニア旧ユーゴスラヴィア	TM トルクメニスタン
BY ベラルーシ	GR ギリシャ	共和国	TR トルコ
CA カナダ	HR クロアチア	ML マリ	TT トリニダード・トバゴ
CF 中央アフリカ	HU ハンガリー	MN モンゴル	UA ウクライナ
CG コンゴ	ID インドネシア	MR モリタニア	UG ウガンダ
CH スイス	IE アイルランド	MW マラウイ	US 米国
CI ニートジボアール	IL イスラエル	MX メキシコ	UZ ウズベキスタン
CM カメルーン	IN インド	NE ニジェール	VN ヴェトナム
CN 中国	IS アイスランド	NL オランダ	YU ユーゴスラビア
CR コスタ・リカ	IT イタリア	NO ノールウェー	ZA 南アフリカ共和国
CU キューバ	JP 日本	NZ ニュー・ジーランド	ZW ジンバブエ
CY キプロス	KE ケニア	PL ポーランド	
CZ チェッコ	KG キルギスタン	PT ポルトガル	
DE ドイツ	KP 北朝鮮	RO ルーマニア	
DK デンマーク	KR 韓国	RU ロシア	

明 細 書

窒化物半導体素子

5 技術分野

本発明は、発光ダイオード（LED）、レーザダイオード（LD）、太陽電池、光センサー等の発光素子、受光素子、あるいはトランジスタ、パワーデバイス等の電子デバイスに使用される窒化物半導体（例えば、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 、 $0 \leq x$ 、 $0 \leq y$ 、 $x+y \leq 1$ ）素子に関する。

10

背景技術

窒化物半導体は高輝度青色LED、純緑色LEDの材料として、フルカラーLEDディスプレイ、交通信号灯、イメージスキャナー光源等の各種光源で実用化されている。これらのLED素子は基本的に、サファイア基板上にGaNよりなるバッファ層と、SiドープGaNよりなるn側コンタクト層と、単一量子井戸構造（SQW：Single-Quantum-Well）のInGaN、あるいはInGaNを有する多重量子井戸構造（MQW：Multi-Quantum-Well）の活性層と、MgドープAlGaNよりなるp側クラッド層と、MgドープGaNよりなるp側コンタクト層とが順に積層された構造を有しており、20mAにおいて、発光波長450nmの青色LEDで5mW、外部量子効率9.1%、520nmの緑色LEDで3mW、外部量子効率6.3%と非常に優れた特性を示す。

20

このように窒化物半導体発光デバイスにはInGaNよりなる井戸層を有する単一量子井戸構造、若しくは多重量子井戸構造の活性層を有するダブルヘテロ構造が採用されている。

25

また、窒化物半導体発光デバイスにおいて、多重量子井戸構造は、複数のミニバンドからなる構造を有し、効率よく、小さな電流でも発光が実現することから、単一量子井戸構造より発光出力が高くなる等の素子特性の向上が期待されている。

例えば、多重量子井戸構造の活性層を用いたLED素子として、特開平10-135514号公報には、発光効率及び発光光度を良好とするため、少なくとも

アンドープのGa_{0.5}N_{0.5}からなるバリア層、アンドープのInGa_{0.5}N_{0.5}からなる井戸層からなる多重量子井戸構造の発光層、更に発光層のバリア層よりも広いバンドギャップを持つクラッド層を有する窒化物半導体素子が開示されている。

しかし、活性層を多重量子井戸構造とすると、単一量子井戸構造のものに比較して、活性層全体の膜厚が厚いため、縦方向の直列抵抗が高くなり、例えばLED素子ではV_f（順方向電圧）が高くなる傾向にある。

V_fを低下させる技術として使用できる可能性がある技術として、例えば特開平9-298341号に活性層よりも上にあるp側の光導波層、コンタクト層等をInAlGa_{0.5}N層を含む超格子層とするレーザ素子が記載されている。この技術はp型の窒化物半導体層をInを含む窒化物半導体層を含む超格子構造とすることによって、p層のキャリア濃度を増加させ、レーザ素子の閾値を低減させようとするものである。しかし、現実にはInAlGa_{0.5}Nのような4元混晶の窒化物半導体は結晶性が悪く、またInを含む窒化物半導体はp型になりにくいいため、実際にLED素子又はLD素子を作製することは困難である。

このように多重量子井戸構造の活性層は、発光出力の飛躍的な向上が期待されながらも、その期待される可能性を十分に発揮させることが困難であった。

尚、LD素子に関しては、本出願人は窒化物半導体基板の上に、活性層を含む窒化物半導体レーザ素子を作製して、世界で初めて室温での連続発振1万時間以上を達成したことを発表した（ICNS'97 予稿集, October 27-31, 1997, P444-446、及び Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36(1997) pp. L1568-1571, Part2, No. 12A, 1 December 1997）。

しかしながら、例えば、LED素子を照明用光源、直射日光の当たる屋外ディスプレイ等を使用するためには、さらにV_fが低くかつ発光効率の高い素子が求められている。また、LD素子については、光ピックアップ等の光源に使用するためには、さらに閾値を低下させて長寿命にする等、よりいっそうの改良が必要である。

また最近では、この窒化物半導体を用いた発光素子において、従来Ga_{0.5}N_{0.5}が用いられていたp側電極が形成されるp型コンタクト層を、特開平8-97468号公報に開示されているように、バンドキャップエネルギーがGa_{0.5}N_{0.5}に比較して

小さいInGa_Nを用いて形成する検討されている。すなわち、バンドキャップエネルギーが小さいInGa_Nを用いることにより、p型コンタクト層とp側電極との間の障壁を低くして良好なオーミック接触を得ようとするものである。

5 しかしながら、InGa_Nは、欠陥の少ない結晶性の良い膜を成長させることが難しく、期待通りの十分低い接触抵抗を有するオーミック接触を得ることは困難であった。また、成長されたInGa_N層の結晶性がバラツクために接触抵抗が安定しないという問題点があった。そのために、InGa_Nからなるp型コンタクト層を備えた従来の窒化物半導体素子は、十分低くかつ安定した動作電圧と高い出力を得ることが困難であった。このために、例えば、InGa_Nからなる
10 コンタクト層を用いてLED素子を構成した場合、20mAにおける順方向電圧(V_f)は、3.4V～3.8Vと十分低くできず、かつそのバラツキが大きいという問題点があった。

 またさらに、窒化物半導体からなる素子は、その構造上、人体に生じる静電気より遥かに弱い100Vの電圧でさえも劣化する可能性がありその取り扱いに留
15 意する必要がある。従って、窒化物半導体素子の信頼性をより高めるためには、静電耐圧のさらなる向上が求められていた。

発明の開示

 本発明はこのような事情を鑑みて成されたものであって、その目的とするところは、主としてLED、LD等の窒化物半導体素子の出力を向上させると共に、
20 V_f、閾値を低下させて素子の発光効率を向上させることにある。発光効率を向上させることは、ひいては受光素子等の窒化物半導体を用いた他の電子デバイスの効率も向上させることにつながるものである。

 また、本発明は、多重量子井戸構造の活性層を用いその特性を十分発揮させる
25 ことにより、発光出力のさらなる向上を図り、窒化物半導体発光素子の種々の応用製品への適用範囲の拡大を目的とするものである。

 また、本発明は、p側電極とp型コンタクト層との接触抵抗を小さくでき、安定した低い動作電圧で高い出力が得られる窒化物半導体素子を提供することを目的とするものである。

さらに、本発明は、発光出力を向上させることができかつ静電耐圧が良好な窒化物半導体発光素子を提供することを目的とするものである。

本発明に係る第1の窒化物半導体素子は、以下の構成によりV_f、閾値を低下させて発光効率を向上させるものである。

すなわち、本発明の第1の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、Inを含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜とが積層されたn側多層膜層を有し、前記第1の窒化物半導体膜、または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の膜厚が100オングストローム以下であることを特徴とする。

本発明の第1の窒化物半導体素子において、好ましくは第1の窒化物半導体膜および第2の窒化物半導体膜の両方を100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下にする。このように膜厚を薄くすることにより、多層膜層が超格子構造となつて、多層膜層の結晶性を良くできるので、出力を向上させることができる。なお、活性層は少なくともInを含む窒化物半導体、好ましくはInGa_{1-x}Nよりなる井戸層を有する単一量子井戸構造、若しくは多重量子井戸構造とすることが望ましい。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子において、第1の窒化物半導体膜はIn_xGa_{1-x}N (0<x<1)とし、第2の窒化物半導体膜はIn_yGa_{1-y}N (0≤y<1、y<x)、好ましくはGa_{1-y}Nとすることが最も好ましい。

さらに、本発明の第1の窒化物半導体素子では、前記第1の窒化物半導体膜または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の膜厚が、近接する第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜同士で互いに異なつてもよい。即ち、第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜を複数層積層した多層膜層を形成した場合に、第2の窒化物半導体膜(第1の窒化物半導体膜)を挟む2つの第1の窒化物半導体膜(第2の窒化物半導体膜)の膜厚を互いに異なるようにしてもよい。

さらにまた、本発明の第1の窒化物半導体素子では、前記第1の窒化物半導体膜、または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族元素の組成が、近接する第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜の同一III族元素の組成同士で互いに異なるようにしてもよい。即ち、第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜を複数層積層した多層膜層を形成した場合に、第2の窒化物半導体膜（第1の窒化物半導体膜）を挟んだ第1の窒化物半導体膜（第2の窒化物半導体膜）のIII族元素の組成比が互いに異なるようにしてもよい。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子では、n側多層膜層は活性層と離間して形成されていても良いが、出力をより向上させるためには、活性層に接するように形成することが好ましい。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子においては、第1の窒化物半導体膜および第2の窒化物半導体膜がアンドープであってもよい。ここで、アンドープとは意図的に不純物をドーピングしない状態を指し、例えば隣接する窒化物半導体層から拡散により混入される不純物も本発明ではアンドープという。なお拡散により混入される不純物は層内において不純物濃度に勾配がついていることが多い。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子では、第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜のいずれか一方に、n型不純物がドーピングされていてもよい。これは変調ドーピングと呼ばれるもので、変調ドーピングすることにより、出力を向上させることができる。なおn型不純物としては、Si、Ge、Sn、S等のIV族、VI族元素を選択して用いることができ、好ましくはSi、Snを用いる。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子では、第1の窒化物半導体膜および第2の窒化物半導体膜の両方にn型不純物がドーピングされていてもよい。n型不純物をドーピングする場合、不純物濃度は $5 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 以下、好ましくは $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 以下に調整する。 $5 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ よりも多いと窒化物半導体層の結晶性が悪くなって、逆に出力が低下する傾向がある。これは変調ドーピングの場合も同様である。

さらに、本発明の第1の窒化物半導体素子では、前記p側領域の窒化物半導体層として、Alを含む第3の窒化物半導体膜と、第3の窒化物半導体と異なる組成を有する第4の窒化物半導体膜とが積層されてなるp側多層膜層を有しかつ、

前記第3の窒化物半導体膜、または前記第4の窒化物半導体の層の内の少なくとも一方の膜厚を100オングストローム以下とすることが好ましい。また、本発明において、さらに好ましくは第3の窒化物半導体膜、および第4の窒化物半導体膜の両方を100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下にする。このように膜厚を薄くすることにより、多層膜層が超格子構造となって、多層膜層の結晶性が良くなるので、出力を向上させることができる。

またさらに、本発明の第1の窒化物半導体素子では、第3の窒化物半導体膜は $\text{Al}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 < a \leq 1$) とし、前記第4の窒化物半導体膜は $\text{In}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 \leq b < 1$ 、 $b < a$) とすることが好ましく、さらに好ましくは前記第4の窒化物半導体膜は GaN とする。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子では、前記第3の窒化物半導体膜、または前記第4の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の膜厚が、近接する第3の窒化物半導体膜または第4の窒化物半導体膜同士で互いに異なるようにしてもよい。即ち、第3の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜をそれぞれ複数層用いて積層した場合に、第3の窒化物半導体膜（第4の窒化物半導体膜）を挟んだ第4の窒化物半導体膜（第3の窒化物半導体膜）の膜厚が互いに異なるようにしてもよい。

さらに、本発明の第1の窒化物半導体素子では、前記第3の窒化物半導体膜、または前記第4の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族元素の組成が、近接する第3の窒化物半導体膜または第4の窒化物半導体膜の同一III族元素の組成同士で互いに異なるようにしてもよい。即ち、第3の窒化物半導体膜または第4の窒化物半導体膜を複数層積層した多層膜層を形成した場合に、第3の窒化物半導体膜（第4の窒化物半導体膜）を挟んだ第4の窒化物半導体膜（第3の窒化物半導体膜）のIII族元素の組成比が互いに異なるようにしてもよい。

またさらに、本発明の第1の窒化物半導体素子では、p側多層膜層は、n側多層膜層と同じく活性層と離間して形成されていても良いが、好ましくは活性層に接して形成されているようにする。このように活性層に接して形成するとより出力を向上させることができる。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子では、第3の窒化物半導体膜および第4の窒化物半導体膜がアンドープであってもよい。p側の多層膜層をアンドープとする場合、その膜厚は $0.1\ \mu\text{m}$ 以下にすることが望ましい。 $0.1\ \mu\text{m}$ よりも厚いと、活性層に正孔が注入されにくくなって、出力が低下しやすい傾向にある。なお、アンドープの定義についてはn側多層膜層と同じである。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子では、第3の窒化物半導体膜または第4の窒化物半導体膜のいずれか一方に、p型不純物がドーピングされていてもよい。このように変調ドーピングすることにより、出力が向上しやすい傾向にある。なおp型不純物としては、Mg、Zn、Cd、Be、Ca等のII族元素を選択することができ、好ましくは、Mg、Beを用いる。

また、本発明の第1の窒化物半導体素子では、第3の窒化物半導体膜および第4の窒化物半導体膜の両方にp型不純物がドーピングされていてもよい。p型不純物をドーピングする場合、不純物濃度は $1 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ 以下、好ましくは $5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 以下に調整する。 $1 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ よりも多いと窒化物半導体層の結晶性が悪くなって、出力が低下する傾向にある。これは変調ドーピングの場合も同様である。

本発明に係る第2～第5の窒化物半導体素子は、以下の構成により、多重量子井戸構造の活性層を用いた窒化物半導体素子の発光出力を向上させ、窒化物半導体素子の応用製品の適用範囲を拡大させるものである。

すなわち、本発明に係る第2の窒化物半導体膜は、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、n型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされかつ互いに異なるバンドギャップエネルギーを有する少なくとも2種類の窒化物半導体膜が積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、それぞれp型不純物がドーピングされてなりかつ互いにバンドギャップエネルギーが異なる第3と第4の窒化物半導体膜が積層されてなるp側多層膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする。

また、本発明に係る第3の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

5 前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、n型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされている同一組成を有する少なくとも2種類の窒化物半導体膜が積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、それぞれp型不純物がドーピングされてなりかつ互いにバンドギャップエネルギーが異なる第3と第4の窒化物半導体膜が積層されてなるp側多層膜クラッド層であり、

10 前記活性層が、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする。

また、本発明に係る第2及び第3の窒化物半導体素子では、前記第3の窒化物半導体膜のp型不純物濃度と前記第4の窒化物半導体膜のp型不純物濃度とが互いに異なるようにしてもよいし、同一であってもよい。

15 また、本発明に係る第4の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

20 前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、n型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされている同一組成を有する少なくとも2種類の窒化物半導体膜が積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、p型不純物を含み $\text{Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなるp側単一膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする。

25 また、第3又は第4の窒化物半導体素子では、前記n側第1多層膜層は、それぞれ GaN からなりn型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされた2種類の窒化物半導体膜が積層されてなることが好ましい。

さらに、本発明に係る第5の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有す

る窒化物半導体素子において、

前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、n型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされかつバンドギャップエネルギーが異なる少なくとも2種類の窒化物半導体膜が積層されてなるn側第1多層膜層であり、

5 前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、p型不純物を含み $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなるp側単一膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $In_aGa_{1-a}N$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする。

また、第2～第5の窒化物半導体素子では、前記n側第1多層膜層と活性層との間に、 In を含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜とが積層されたn側第2多層膜層を有することが好ましい。

さらに、第2～第5の窒化物半導体素子では、前記n側領域に、前記n側第1多層膜層より基板側に、n型不純物を含むn側コンタクト層を形成するようにしてもよい。

またさらに、第2～第5の窒化物半導体素子では、前記n側コンタクト層が、アンドープ GaN 層の上に形成されていることが好ましい。

また、第2～第5の窒化物半導体素子において、前記アンドープ GaN 層が低温成長させた $Ga_dAl_{1-d}N$ ($0 < d \leq 1$) からなるバッファ層上に形成されることが好ましく、更に前記p側多層膜クラッド層又はp側単一膜クラッド層上にp型不純物として Mg を含むp側 GaN コンタクト層を形成することもできる。

つまり、本発明に係る第2～第5の窒化物半導体素子は、多重量子井戸構造の発光層を挟むように、n側にn型不純物濃度の異なる2種類以上の窒化物半導体層からなるn側第1多層膜層と、p側に第3及び第4の窒化物半導体膜からなるp側多層膜クラッド層又はp型不純物を含み $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなるp側単一膜クラッド層とを組み合わせ形成することにより、発光効率を向上させている。

このように特定の組成や構造等を有する複数の窒化物半導体層を組み合わせることにより、多重量子井戸構造の活性層の性能を効率良く発揮することができる。

また、多重量子井戸構造の活性層との組み合わせで好ましい他の窒化物半導体層を以下に記載する。

本発明に係る第2～第5の窒化物半導体素子において、前記n側第1多層膜層と活性層との間に、Inを含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜とが積層されたn側第2多層膜層を有すると更に発光効率を向上させることができると共に、Vfを低下させて発光効率を向上させることができる。

更に、本発明の第2～第5の窒化物半導体素子において、前記n側第1多層膜層より基板側に、n型不純物を含むn側コンタクト層を形成すると、発光出力を向上させることができ、かつVfを低下させることができる。

また更に、本発明の第2～第5の窒化物半導体素子において、前記n側コンタクト層が、アンドープGaN層の上に形成すると、かかるアンドープGaN層は結晶性の良い層として得られるので、n電極を形成する層となるn側コンタクト層の結晶性を良くでき、n側コンタクト層上に形成される活性層などのその他の窒化物半導体層の結晶性も良くできるので、発光出力をより向上させることができる。

また更に、本発明の第2～第5の窒化物半導体素子において、前記アンドープGaN層が、低温成長させたGa_{1-x}Al_xN (0 < x ≤ 1) からなるバッファ層上に形成されていると、アンドープGaN層の結晶性が更に良好とでき、n側コンタクト層等の結晶性もより良好とできるので、発光出力のさらに向上させることができ、更にまた、p側多層膜クラッド層又はp側単一膜クラッド層上にMgドープp側GaNコンタクト層を形成すると、良好なp型導電性を得ることができる共に、かかるp側GaNコンタクト層がこの上に形成されるp電極と良好なオーミック接触を有し、よりいっそう発光出力を向上させることができる。

また、本発明に係る第6の窒化物半導体素子は、Inを含むp型コンタクト層を超格子構造とすることにより、欠陥の少ない結晶性のよいp型コンタクト層を形成することができることを見出して完成したものであり、低い動作電圧で安定した高い出力が得られる窒化物半導体素子を提供するものである。

すなわち、本発明に係る第6の窒化物半導体素子は、p型コンタクト層を含む

複数の窒化物半導体層を有する p 側領域と複数の窒化物半導体層からなる n 側領域との間に活性層を備えた窒化物半導体素子において、

前記 p 型コンタクト層は、互いに組成の異なる第 1 と第 2 の窒化物半導体膜とを含む膜が順次積層された超格子構造を有し、前記 2 つの窒化物半導体膜のうち
5 少なくとも第 1 の窒化物半導体膜は In を含んでいることを特徴とする。

これによって、p 側電極と p 型コンタクト層との接触抵抗を小さくでき、安定した低い動作電圧で高い出力が得られる。

また、本発明の第 6 の窒化物半導体素子では、前記第 1 の窒化物半導体膜と前記第 2 の窒化物半導体膜との間に、前記第 1 の窒化物半導体膜の組成から前記第
10 2 の窒化物半導体膜の組成へと組成が連続的に変化する組成傾斜層を形成することが好ましく、これにより、さらに p 型コンタクト層の結晶性を良好にできる。

また、本発明の第 6 の窒化物半導体素子では、前記第 1 の窒化物半導体膜の In の含有量を前記第 2 の窒化物半導体膜の In の含有量に比較して大きくすることが好ましい。このようにすると、p 型コンタクト層の抵抗をより低くできる。

また、本発明の第 6 の窒化物半導体素子において、前記 2 つの窒化物半導体層のうち的一方を In を含む層とする場合、一方の前記第 1 の窒化物半導体膜は $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ からなる層とし、他方の第 2 の窒化物半導体膜は $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ からなる層とすることが好ましい。

さらに、本発明の第 6 の窒化物半導体素子において、前記第 1 の窒化物半導体膜及び前記第 2 の窒化物半導体膜のうちのいずれか一方に p 型不純物をドーピングし、
20 他方には p 型不純物をドーピングしないようにしてもよい。

また、本発明の第 6 の窒化物半導体素子において、前記第 1 及び第 2 の窒化物半導体膜にそれぞれ p 型不純物をドーピングする場合、一方の窒化物半導体層には $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ の範囲の p 型不純物をドーピングし、他方の
25 窒化物半導体層は $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲であってかつ前記一方の窒化物半導体層より少ない量の p 型不純物がドーピングされていることが好ましい。

また、本発明の第 6 の窒化物半導体素子において、前記第 1 の窒化物半導体膜が最表面に形成され、かつ p 側電極が前記露表面に形成された該窒化物半導体層

に接するように形成されていることが好ましい。また、この場合、前記第1の窒化物半導体膜のp型不純物濃度が、前記第2の窒化物半導体膜より大きくなるようにすることが好ましい。

5 本発明の第6の窒化物半導体素子においてさらに、前記活性層と前記p型コンタクト層との間にAlを含む窒化物半導体からなるp型クラッド層を備えていてもよい。

本発明の第6の窒化物半導体素子においては、前記p型クラッド層は、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$) からなる層と $In_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y < 1$) からなる層とが交互に積層された超格子構造を有することが好ましい。

10 以上のように、本発明に係る第6の窒化物半導体素子は、互いに組成の異なる第1と第2の窒化物半導体膜が交互に積層された超格子構造を有し、前記2つの窒化物半導体層のうち少なくとも第1の窒化物半導体膜はInを含んでいるp型コンタクト層を備えている。これによって、欠陥の少ない結晶性のよいp型コンタクト層を形成することができ、p型コンタクト層自身の抵抗値を低くできかつ
15 p側電極とp型コンタクト層との接触抵抗を小さくできるので、安定した低い動作電圧で高い出力が得られる。

また、本発明に係る第7及び第8の窒化物半導体素子は、以下の構成により、多重量子井戸構造の活性層を用いた窒化物半導体素子の発光出力を向上させかつ静電耐圧を良好にでき、多重量子井戸構造の活性層を用いた窒化物半導体素子の
20 適用範囲を拡大するものである。

すなわち、本発明に係る第7の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

25 前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、アンドープの窒化物半導体膜からなる下層、n型不純物がドーブされている窒化物半導体膜からなる中間層、及びアンドープの窒化物半導体膜からなる上層の少なくとも3層が順に積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、それぞれp型不純物がドーブされてなりかつ互いにバンドギャップエネルギーが異なる第3と第4の窒化

物半導体膜が積層されてなるp側多層膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする。

また、本発明に係る第7の窒化物半導体素子においては、前記第3の窒化物半導体膜のp型不純物濃度と前記第4の窒化物半導体膜のp型不純物濃度とが互いに異なっているいてもよいし、同一であってもよい。

また、本発明に係る第8の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域の間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、アンドープの窒化物半導体からなる下層、n型不純物がドーピングされている窒化物半導体からなる中間層、及びアンドープの窒化物半導体からなる上層の少なくとも3層が順に積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、p型不純物を含み $\text{Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなるp側単一膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) を含んでなる多重量子井戸構造であることを特徴とする。

さらに、本発明に係る第7及び第8の窒化物半導体素子においては、前記n側第1多層膜層が、膜厚100～10000オングストロームのアンドープの窒化物半導体からなる下層、膜厚50～1000オングストロームのn型不純物がドーピングされている窒化物半導体からなる中間層、及び膜厚25～1000オングストロームのアンドープの窒化物半導体からなる上層からなることを特徴とする。

本発明に係る第7及び第8の窒化物半導体素子においては、前記n側第1多層膜層と活性層との間に、Inを含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜とが積層されたn側第2多層膜層を有することが好ましい。

またさらに、本発明に係る第7及び第8の窒化物半導体素子においては、前記n側窒化物半導体層に、前記n側第1多層膜層（変調ドーピング）より基板側に、n型不純物を含むn側コンタクト層を有しているてもよい。

本発明に係る第7及び第8の窒化物半導体素子においては、前記n側コンタクト層が、アンドープGa_{1-x}N層の上に形成されていることが好ましい。

また、本発明に係る第7及び第8の窒化物半導体素子においては、前記窒化物半導体素子において、前記アンドープGa_{1-x}N層が低温成長させたGa_{1-x}Al_xN
5 (0 < x ≤ 1) からなるバッファ層上に形成されるようにし、更に前記p側多層膜クラッド層又はp側単一膜クラッド層上にp型不純物としてMgを含むp側Ga_{1-x}Nコンタクト層を形成してもよい。

つまり、本発明に係る第7及び第8の窒化物半導体素子では、多重量子井戸構造の活性層を挟むように、n側領域にアンドープの下層、n型不純物ドーブの中間層、及びアンドープの上層の特定の層構成からなるn側第1多層膜層と、p側領域に第3及び第4の窒化物半導体膜からなるp側多層膜クラッド層又はp型不純物を含みAl_bGa_{1-b}N (0 ≤ b ≤ 1) よりなるp側単一膜クラッド層とを組み合わせて形成することにより、発光効率が向上し発光出力の良好な、しかも、
10 静電耐圧の良好な窒化物半導体素子を得ることができる。

15 このように特定の組成や層構造等を有する複数の窒化物半導体層を組み合わせることにより、多重量子井戸構造の活性層の性能を効率良く発揮することができるとともに、静電耐圧を良好にできる。

更に本発明は、n側第1多層膜層を構成する各層の膜厚を特定の範囲の組み合わせにすることにより、良好な発光出力と共に静電耐圧をより良好にすることができる。
20

尚、本発明において、アンドープとは、意図的に不純物をドーブしないで形成した層を示し、隣接する層からの不純物の拡散、原料又は装置からのコンタミネーションにより不純物が混入した層であっても、意図的に不純物をドーブしていない場合にはアンドープ層とする。なお、拡散により混入する不純物は層内において不純物濃度に勾配がついている場合がある。
25

また、多重量子井戸構造の活性層との組み合わせにおいて、好ましいその他の窒化物半導体層を以下に記載する。

本発明において、前記n側第1多層膜層と活性層との間に、Inを含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化

物半導体膜とが積層された n 側第 2 多層膜層を有すると更に発光効率を向上させることができると共に、順方向電圧（以下、 V_f とする。）を低下させて発光効率を向上させることができる。

5 更に、本発明において、前記 n 側第 1 多層膜層より基板側に、n 型不純物を含む n 側コンタクト層を有すると、発光出力を向上させ、 V_f を低下させることができる。

また更に、本発明において、前記 n 側コンタクト層が、アンドープ GaN 層の上に形成されてなると、かかるアンドープ GaN 層は結晶性の良い層として得られるので、n 電極を形成する層となる n 側コンタクト層の結晶性が良くなり、n 側コンタクト層上に形成される活性層などのその他の窒化物半導体層の結晶性も良くなり、発光出力を向上させることができる。

また更に、本発明において、前記アンドープ GaN 層が、低温成長させた $Ga_{1-d}Al_dN$ ($0 < d \leq 1$) からなるバッファ層上に形成されていると、アンドープ GaN 層の結晶性が更に良好とでき、n 側コンタクト層等の結晶性もより良好となり、発光出力のさらなる向上が可能となる。更にまた、p 側多層膜クラッド層又は p 側単一膜クラッド層上に Mg ドープ p 側 GaN コンタクト層を形成してなると、良好な p 型特性を容易に得ることができ、p 側 GaN コンタクト層とこの上に形成される p 電極との良好なオーミック接触が得られるので、発光出力をより向上させることができる。

20 また、本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子は、n 側領域と p 側領域にそれぞれ多層膜層を備え、n 側領域の多層膜層と p 側領域の多層膜層とを組成又は層数の点で非対称とすることにより、発光出力と静電耐圧を高くしてかつ V_f を低くして、種々の応用製品への適用範囲の拡大させるものである。

すなわち、本発明に係る第 9 の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に、活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる n 型多層膜層であり、

前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が

積層されてなる p 型多層膜層でありかつ、

前記 n 型多層膜層を構成する組成と、p 型多層膜層を構成する組成とが異なることを特徴とする。

また、本発明に係る第 10 の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に、活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる n 型多層膜層であり、

前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる p 型多層膜層でありかつ、

前記 n 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数と、p 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数とが異なることを特徴とする。

さらに、本発明に係る第 11 の窒化物半導体素子は、複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に、活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる n 型多層膜層であり、

前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる p 型多層膜層でありかつ、

前記 n 型多層膜層を構成する組成と、p 型多層膜層を構成する組成とが異なり、かつ前記 n 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数と、p 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数とが異なることを特徴とする。

また、本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子において、前記 p 型多層膜層を構成する窒化物半導体層の層数が、n 型多層膜層を構成する窒化物半導体層の層数より少ないことが好ましい。

また、本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子では、前記 n 型多層膜層が、 $Al_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z < 1$) と $In_pGa_{1-p}N$ ($0 < p < 1$) とを含み、前記 p 型多層膜層が、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) と $In_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y < 1$) とを含んでなることが好ましい。

さらに、本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子は、前記 p 型多層膜層及び／又は n 型多層膜層が、変調ドーピングされていることが好ましい。

つまり、本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子は、上述のように、活性層を挟むように n 型と p 型とで組成及び／又は層数が異なる n 型多層膜層と p 型多層膜層とを形成し、素子構造の活性層付近の層構成を特定することにより、
5 発光出力を向上させ、 V_f を低くでき、静電耐圧の良好な窒化物半導体素子を提供することができる。

量子井戸構造の活性層は、発光出力を向上させる可能性を秘めているが、従来の素子では、量子井戸構造の可能性を十分満足できる程度に発揮させることが困難であった。
10

これに対して、本発明者らは、量子井戸構造の活性層の性能を十分発揮させるべく、種々検討した結果、活性層に接して又は近接して互いに組成及び／又は層数の異なる n 型多層膜層と p 型多層膜層とを形成することにより、活性層の性能を良好に引き出して発光出力の向上を達成するとともに、 V_f の低下、及び静電耐圧の向上を達成することができた。
15

この理由は定かではないが、恐らく多層膜とすることにより結晶性が向上し、活性層の結晶性や p 電極を形成する層の結晶性を良好とすることに加え、更に、組成及び／又は層数が異なることによる n 型多層膜層と p 型多層膜層との結晶の性質の相違が相乗的に作用して素子全体に好影響を及ぼし、素子性能（発光出力、 V_f 、静電耐圧等）を向上させていると考えられる。
20

本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子において、多層膜層とは、少なくとも組成の異なる 2 種類以上の単一の窒化物半導体層を少なくとも 2 層以上積層させてなるものであり、隣接する単一の窒化物半導体層同士で組成が異なるように、単一の窒化物半導体層を複数層積層してなる。

また、本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子において、n 型多層膜層を構成する窒化物半導体の組成と、p 型多層膜層を構成する窒化物半導体の組成とが異なるとは、それぞれの多層膜層を構成する単一の窒化物半導体の組成が同一であってもよいが、単一の窒化物半導体層を複数積層してなる多層膜層の全体の層構成（全体の組成）が一致しないことを意味する。つまり、n 型多層膜層と
25

p型多層膜層とは、それらを構成する組成が、部分一致を有していてもよいが、完全一致しないように窒化物半導体層の組成が調整される。

例えば、組成が異なるとは、窒化物半導体を構成する元素（例えば、2元混晶や3元混晶の元素の種類）、元素の比、又はバンドギャップエネルギーなどが異なる場合が挙げられる。またこれらの値は、多層膜層では全体の平均の値となる。

また、本発明において、積層された層数が異なるとは、p型又はn型のいずれか一方が、多層膜層を構成する窒化物半導体が少なくとも一層以上多く積層されていけばよい。

更に、本発明に係る第9～第11の窒化物半導体素子において、p型多層膜層を構成する窒化物半導体層の層数が、n型多層膜層を構成する窒化物半導体層の層数より少ない方が、発光出力、V_f及び静電耐圧の特性をいすれも良好にできるので、好ましい。

またさらに、本発明に係る第9～第11の窒化物半導体素子において、p型多層膜層の積層された層数が、n型多層膜層の積層された層数より少なくとも一層すくなければよい。

更に本発明に係る第9～第11の窒化物半導体素子は、n型多層膜層が、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x < 1$) と $In_pGa_{1-p}N$ ($0 < p < 1$) とを含んでなり、p型多層膜層が、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) と $In_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y < 1$) とを含んでいることにより、より良好な発光出力、V_f及び静電耐圧を得ることができる。

またさらに、本発明に係る第9～第11の窒化物半導体素子は、p型多層膜層及び／又はn型多層膜層が、変調ドーピングされていると、発光出力、V_f及び静電耐圧を向上させることができる。

また、本発明に係る第9～第11の窒化物半導体素子において、変調ドーピングとは、多層膜層を形成する単一の窒化物半導体層において、隣接する窒化物半導体層同士の不純物濃度が異なることをいい、多層膜層を構成する隣接の一方の窒化物半導体層がアンドーピングで、他方が不純物をドーピングされていてもよく、また、隣接する両方の窒化物半導体層に不純物がドーピングされている場合に、隣接する窒化物半導体同士で不純物濃度が異なってもよい。

また、本発明に係る第 9 ～ 第 11 の窒化物半導体素子において、n 型多層膜層と p 型多層膜層との組成が異なる場合、n 型多層膜層を構成する層数と p 型多層膜層を構成する層数とは、同一でも、異なってもよく、好ましくは層数が異なり、より好ましくは p 型多層膜層の層数が n 型多層膜層の層数より少ないことが、発光出力、V_f、静電耐圧の点で好ましい。

また、本発明において、n 型多層膜層と p 型多層膜層との層数が異なる場合、n 型多層膜層の組成と p 型多層膜層の組成とは、同一でも異なってもよく、好ましくは組成が異なることが、上記のような本発明の効果をj得るのに好ましい。

また、本発明において、n 型多層膜層と p 型多層膜層との層数が異なる場合、n 型と p 型との層数の組み合わせは特に限定されず、p 型多層膜層と n 型多層膜層の層数が異なっていれば、いずれの組み合わせでもよく、好ましくは、上記したように、p 型多層膜層の層数が n 型多層膜層の層数より少ないようにすることが、上記本発明の効果をj得る上で好ましい。

図面の簡単な説明

図 1 は、本発明に係る実施の形態 1 の窒化物半導体素子（LED 素子）の構成を示す模式断面図である。

図 2 は、本発明に係る実施例 2 の LED 素子の構成を示す模式断面図である。

図 3 は、本発明に係る実施例 16 の窒化物半導体発光素子（LD 素子）の構成を示す斜視図である。

図 4 は、本発明に係る実施の形態 2 の窒化物半導体素子（LED 素子）の構造を示す模式断面図である。

図 5 は、本発明に係る実施の形態 3 の窒化物半導体発光素子の構成を示す模式断面図である。

図 6 A は、本発明に係る実施の形態 4 の窒化物半導体発光素子における p 側コンタクト層の構成を模式的に示す断面図である。

図 6 B は、図 6 A の In 組成を模式的に示すグラフである。

図 7 は、本発明における多層膜（p 側コンタクト層）の波長に対する光吸収率を示すグラフである。

図 8 は、本発明に係る実施の形態 5 の窒化物半導体素子（LED 素子）の構成を示す模式断面図である。

図 9 A は、実施の形態 5 において、アンドープの上層 305 c の膜厚に対する P_0 及び V_f の相対値を示すグラフである。

5 図 9 B は、実施の形態 5 において、アンドープの上層 305 c の膜厚に対する静電耐圧相対値を示すグラフである。

図 10 A は、実施の形態 5 において、中間層 305 b の膜厚に対する P_0 及び V_f の相対値を示すグラフである。

10 図 10 B は、実施の形態 5 において、中間層 305 b の膜厚に対する静電耐圧相対値を示すグラフである。

図 11 A は、実施の形態 5 において、アンドープの下層 305 a の膜厚に対する P_0 及び V_f の相対値を示すグラフである。

図 11 B は、実施の形態 5 において、アンドープの上層 305 a の膜厚に対する静電耐圧相対値を示すグラフである。

15

発明を実施するための最良の形態

以下、図面を参照しながら、本発明を実施するための好ましい形態について説明する。

実施の形態 1.

20 図 1 は本発明に係る実施の形態 1 の窒化物半導体素子（LED 素子）の構造を示す模式的な断面図である。この LED 素子はサファイア基板 1 の上に、GaN よりなる第 1 のバッファ層 2、アンドープ GaN よりなる第 2 のバッファ層 3、Si ドープ GaN よりなる n 側コンタクト層 4、アンドープ GaN よりなる第 3 のバッファ層 5、InGa N /GaN 超格子構造よりなる n 側多層膜層 6、InGa N /GaN よりなる多重量子井戸構造の活性層 7 と、AlGa N /GaN 超格子構造よりなる p 側多層膜層 8、Mg ドープ GaN よりなる p 側コンタクト層 9 が順に積層された構造を有する。

25

すなわち、実施の形態 1 の LED 素子は、サファイア基板 1 の上において、多重量子井戸構造の活性層 7 が、第 1 のバッファ層 2、第 2 のバッファ層 3、n 側

コンタクト層 4、第 3 のバッファ層 5 及び n 側多層膜層 6 からなる n 側領域 30 と、p 側多層膜層 8 及び p 側コンタクト層 9 からなる p 側領域とによって挟設されてなる。

5 本実施の形態 1 の窒化物半導体素子では、図 1 に示すように、活性層 7 を挟んで下部にある n 側領域 30 に、In を含む第 1 の窒化物半導体膜 6a と、その第 1 の窒化物半導体膜 6a と異なる組成を有する第 2 の窒化物半導体膜 6b とが積層された n 側多層膜層 6 を有している。n 側多層膜層 6 において、第 1 の窒化物半導体膜 6a、第 2 の窒化物半導体膜 6b はそれぞれ少なくとも一層以上形成し、合計で 3 層以上、さらに好ましくはそれぞれ少なくとも 2 層以上積層し、合計で
10 4 層以上積層することが望ましい。n 側多層膜層 6 が活性層 7 に接して形成されている場合、活性層の最初の層（井戸層、若しくは障壁層）と接する多層膜層は第 1 の窒化物半導体膜 6a でも、第 2 の窒化物半導体膜 6b いずれでも良く、n 側多層膜層の積層順序は特に問うものではない。なお、図 1 では n 側多層膜層 6 が、活性層 7 に接して形成されているが、本実施の形態 1 では、この多層膜層 6 と活性層 7 との間に、他の n 型窒化物半導体よりなる層を有していても良い。また、この n 側多層膜層 6 を構成する第 1 の窒化物半導体膜 6a または第 2 の窒化物半導体膜 6b の少なくとも一方の膜厚を 100 オングストローム以下、好ましくは 70 オングストローム以下、最も好ましくは 50 オングストローム以下とすることにより、薄膜層が弾性臨界膜厚以下となって結晶が良くなり、その上に積
15 層する第 1、若しくは第 2 の窒化物半導体膜の結晶性を良くできるので、多層膜層全体の結晶性を良好にでき、素子の出力を向上させることができる。

第 1 の窒化物半導体膜 6a は In を含む窒化物半導体、好ましくは 3 元混晶の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 1$) とし、さらに好ましくは x 値が 0.5 以下の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、最も好ましくは x 値が 0.1 以下の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ とする。一方、第 2
20 の窒化物半導体膜 6b は第 1 の窒化物半導体膜 6a と組成が異なる窒化物半導体であれば良く、特に限定しないが、結晶性の良い第 2 の窒化物半導体 6b を成長させるためには、第 1 の窒化物半導体 6a よりもバンドギャップエネルギーが大きい 2 元混晶あるいは 3 元混晶の窒化物半導体を成長させ、その中でも GaN とすると、全体に結晶性の良い多層膜層が成長できる。従って最も好ましい組み合

わせは、第1の窒化物半導体膜6aとしてX値が0.5以下の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ を用い、第2の窒化物半導体膜6bとしてGa₂Nを使用した組み合わせである。

好ましい態様として、第1および第2の窒化物半導体膜の双方の膜厚を100
5 オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは
50オングストローム以下にする。このように、第1及び第2の窒化物半導体膜
のそれぞれの膜厚を100オングストローム以下とすることにより、第1及び第
2の窒化物半導体膜のいずれもが、弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる
場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長できる。また、両方を70オン
グストローム以下にすることによって、多層膜層が超格子構造となり、この結晶
10 性の良い超格子構造の多層膜層上に活性層を成長させると、多層膜層がバッファ
層のような作用をして、活性層を結晶性よく成長させることができる。

また、本実施の形態1では、第1、または前記第2の窒化物半導体膜の内の少
なくとも一方の膜厚を、近接する第1、または第2の窒化物半導体膜同士で互い
に異なるようにすることもできる。例えば第1の窒化物半導体膜を InGa_2N と
15 し、第2の窒化物半導体膜をGa₂Nとした場合、Ga₂N層とGa₂N層の間に位置
する InGa_2N 層の膜厚を、活性層に接近するに従って次第に厚くしたり、また
薄くしたりすることにより、多層膜層内部において屈折率を変化させることがで
きるため、屈折率が次第に変化する層を形成することができる。即ち、実質的に
組成傾斜した窒化物半導体層を形成するのと同じ効果が得られる。このため例え
20 ばレーザ素子のような光導波路を必要とする素子においては、この多層膜層で導
波路を形成して、レーザ光のモードを調整できる。

また、第1、または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族
元素の組成を、近接する第1の窒化物半導体膜間または第2の窒化物半導体膜間
で互いに異なるようにすることもできる。例えば、第1の窒化物半導体膜を In
25 Ga₂Nとし、第2の窒化物半導体膜をGa₂Nとした場合、Ga₂N層とGa₂N層の
間に位置する InGa_2N 層のIn組成を活性層に接近するに従って次第に多くし
たり、また少なくしたりすることにより、膜厚を順次変化させた場合と同様、多
層膜層内部において屈折率を変化させて、実質的に組成傾斜した窒化物半導体層
を形成することができる。なおIn組成が減少するに従い、屈折率は小さくなる

傾向にある。

また、実施の形態 1 では、第 1 および第 2 の窒化物半導体膜は両方ともアンド
ープでも良いし、両方に n 型不純物がドーピングされていて良いし、またいずれか
一方に不純物がドーピングされていてよい。結晶性を良くするためには、アンドー
5 プが最も好ましく、次に変調ドーピング、その次に両方ドーピングの順である。なお両方
に n 型不純物をドーピングする場合、第 1 の窒化物半導体膜の n 型不純物濃度と、第
2 の窒化物半導体膜の n 型不純物濃度は異なっても良い。

さらに本実施の形態 1 では、図 1 に示すように、活性層 7 を挟んで上部にある
p 側領域に、Al を含む第 3 の窒化物半導体膜 8 a と、その第 3 の窒化物半導体
10 膜 8 a と異なる組成を有する第 4 の窒化物半導体膜 8 b とが積層された p 側多層
膜層 8 を有している。p 側多層膜層 8 において、n 側の多層膜層 6 と同様に第 3
の窒化物半導体膜 8 a、第 4 の窒化物半導体膜 8 b それぞれ少なくとも一層以上
形成し、合計で 3 層以上、さらに好ましくはそれぞれ少なくとも 2 層以上積層し、
合計で 4 層以上積層することが望ましい。さらに、p 側領域にも多層膜層を設け
15 る場合、n 側の多層膜層よりも膜厚を薄くする方が、素子の V_f 、閾値が低下し
やすくなる傾向にある。図 1 に示すように、p 側多層膜層 8 が活性層 7 に接して
形成されている場合、活性層の最終層（井戸層、若しくは障壁層）と接する p 側
多層膜層は第 3 の窒化物半導体膜 8 a でも、第 4 の窒化物半導体膜 8 b いずれで
も良い。なお、図 1 では p 側多層膜層 8 が、活性層 7 に接して形成されているが、
20 この多層膜層 8 と活性層 7 との間に、他の窒化物半導体よりなる層を有してい
ても良い。

また、本実施の形態 1 では、第 4 の窒化物半導体膜の内的一方又は双方の膜厚
を近接する第 3、または第 4 の窒化物半導体膜同士で互いに異なるようにするこ
ともできる。例えば第 3 の窒化物半導体膜を AlGaIn とし、第 4 の窒化物半導
25 体膜を GaIn とした場合、GaIn 層と GaIn 層との間の AlGaIn 層の膜厚を、
活性層に接近するに従って次第に厚くしたり、また薄くしたりすることにより、
多層膜層内部において屈折率を変化させることができるため、実質的に屈折率が
次第に変化する層を形成することができる。即ち、実質的に組成傾斜した窒化物
半導体層を形成するのと同じ効果が得られる。このため例えばレーザ素子のよう

な光導波路、光閉じ込め層を必要とする素子においては、この多層膜層で導波路、閉じ込め層を兼用して、レーザ光のモードを調整できる。

また、第3、または第4の窒化物半導体膜の内の一方又は双方のIII族元素の組成を、近接する第3、または第4の窒化物半導体膜間で互いに異なるようにすることもできる。例えば、第1の窒化物半導体膜を AlGaIn とし、第2の窒化物半導体膜を GaIn とした場合、 GaIn 層と GaIn 層との間の AlGaIn 層の Al 組成を活性層に接近するに従って次第に多くしたり、また少なくしたりすることにより、前述の態様と同じく、多層膜層内部において屈折率を変化させて、実質的に組成傾斜した窒化物半導体層を形成することができる。なお Al 組成が増加するに従い、屈折率は小さくなる。従って目的に応じて、これら組成傾斜した層をp層側に配することができる。

第3の窒化物半導体膜8aは Al を含む窒化物半導体、好ましくは3元混晶の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}$ ($0 < x < 1$) とし、最も好ましくは x 値が0.5以下の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}$ とする。 x の値が0.5を超えると結晶性が悪くなってクラックが入りやすい傾向にある。一方、第4の窒化物半導体膜8bは第3の窒化物半導体膜8aと組成が異なる窒化物半導体であれば良く、特に限定しないが、結晶性の良い第4の窒化物半導体8bを成長させるためには、第3の窒化物半導体よりもバンドギャップエネルギーが小さい2元混晶あるいは3元混晶の窒化物半導体を成長させ、その中でも GaIn とすると、全体に結晶性の良い多層膜層が成長できる。従って最も好ましい組み合わせとしては、第3の窒化物半導体膜8aが x 値が0.5以下の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}$ であり、第4の窒化物半導体膜8bが GaIn との組み合わせである。

さらに、第3の窒化物半導体膜8aの膜厚を100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下にする。同様に第4の窒化物半導体膜8bの膜厚も100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下とする。このように単一の第1又は第2の窒化物半導体膜の膜厚を100オングストローム以下とすることにより、その窒化物半導体の弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長でき、ま

た窒化物半導体層の結晶性が良くなるので、p型不純物を添加した場合にキャリア濃度が大きく抵抗率の小さいp層が得られ、素子のV_f、閾値等を低下させることができる。

5 第3の窒化物半導体膜8aおよび第4の窒化物半導体膜8bは両方ともアンドープでも良いし、両方にp型不純物がドーピングされていても良いし、またいずれか一方にp型不純物がドーピングされていてもよい。キャリア濃度の高いp層を得るには、変調ドーピングが最も好ましい。なお、先にも述べたようにアンドープとした場合にはその膜厚は0.1 μ m以下、好ましくは700オングストローム以下、さらに好ましくは500オングストローム以下にする。0.1 μ mを超えると、
10 アンドープ層の抵抗値が高くなる傾向にあるからである。両方にp型不純物をドーピングする場合、第3の窒化物半導体膜8aのp型不純物濃度と、第4の窒化物半導体膜8bのp型不純物濃度は異なっても良い。

15 以上の実施の形態1の窒化物半導体素子では、p側領域40にp側多層膜層8を形成するようにしたが、本発明はこれに限らず、図2に示すようにp側多層膜層8に代えて、単層のp側クラッド層18を形成するようにしてもよい。尚、図2の窒化物半導体素子においては、p側クラッド層18とp側コンタクト層9によりp側領域41が構成される。

変形例.

20 以上の実施の形態1では、LED素子を例に説明したが、本発明はこれに限られず、レーザーダイオードに適用しても、実施の形態1と同様の効果が得られ、さらに以下のような変形が可能である。

すなわち、LD素子において、例えば、n側多層膜層を、InGa_xN_{1-x}からなる第1の窒化物半導体膜とGa_{1-x}N_xからなる第2の窒化物半導体膜とを交互に積層することにより構成し、第1の窒化物半導体膜の膜厚を活性層に向かって順次大きくなるように構成する。n側多層膜層をこのように構成することにより、n側多層膜層において、活性層に近づくに従い屈折率の大きいInGa_xN_{1-x}の割合を増加させ、n側多層膜層を活性層に近づくに従って屈折率が大きくなるような屈折率傾斜を有する層とすることができる。

また、LD素子において、p側多層膜層を、AlGa_xN_{1-x}からなる第3の窒化物

半導体膜とGa_{0.9}N_{0.1}からなる第4の窒化物半導体膜とを交互に積層することにより構成し、第3の窒化物半導体膜の膜厚を活性層に向かって順次薄くなるように構成する。p側多層膜層をこのように構成することにより、p側多層膜層において、活性層に近づくに従い、屈折率の小さいAlGa_{0.9}N_{0.1}の割合を減少させ、p側多層膜層を活性層に近づくに従って屈折率が大きくなるような屈折率傾斜を有する層とできる。

以上のように構成されたLD素子は、実施の形態1と同様、各窒化物半導体層の結晶性を良好にできるので、閾値電圧を低くできかつ出力を向上させることができる。

また、LD素子では、活性層を挟むように位置するn側多層膜及びp側多層膜をいずれも、活性層に近づくに従い屈折率が大きくなるような屈折率傾斜を有する層とできるので、良好な光導波路を形成することができ、レーザ光のモードを容易にかつ効果的に調整することができる。

以上の例ではLD素子では、第1又は第3の窒化物半導体膜の膜厚を変化させることによりn側及びp側多層膜層を屈折率傾斜層としたが、本発明はこれに限らず、第2及び第4の窒化物半導体膜の膜厚を順次変化させることにより屈折率傾斜層としてもよい。

また、本発明では、第1、または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族元素の組成を、近接する第1または第2の窒化物半導体膜の同一III族元素の組成を順次異ならせることにより屈折率の傾斜を持たせるようにしてもよい。例えば、第1の窒化物半導体膜をInGa_{0.9}N_{0.1}とし、第2の窒化物半導体膜をGa_{0.9}N_{0.1}とした場合、第1の窒化物半導体膜のInの比率を活性層に接近するに従って次第に多くすることにより、活性層に近づくにつれて屈折率を大きくすることができ、同様の屈折率傾斜した窒化物半導体層を形成することができる。なおGaInNにおいては、In組成が増大するに従い、屈折率は大きくなる。

また、p側多層膜層では、第3、または第4の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族元素の組成を、近接する第3、または第4の窒化物半導体膜間で異ならせることにより、屈折率傾斜層を形成することができる。例えば、第3の窒化物半導体膜をAlGa_{0.9}N_{0.1}とし、第4の窒化物半導体膜をGa_{0.9}N_{0.1}とした場合、

GaN層とGaN層との間のAlGaN層のAl組成を活性層に接近するに従って次第に少なくすることにより、p側多層膜層内部において屈折率を順次変化させて、実質的に組成傾斜した窒化物半導体層を形成することができる。なおAl組成が増加するに従い、屈折率は小さくなる。従って目的に応じて、これら組成傾斜した層をp層側に配することができる。

実施の形態2.

以下、図4を参照しながら、本発明に係る実施の形態2の窒化物半導体素子について説明する。

本発明に係る実施の形態2の窒化物半導体素子は、基板1上に、それぞれ複数の窒化物半導体層からなるn側領域130とp側領域140とによって挟まれた多重量子井戸構造の活性層7を備えたダブルヘテロ構造を有する発光素子である。

詳細には、実施の形態2の窒化物半導体素子において、n側領域30は、図4に示すように、バッファ層102、アンドープGaN層103、n型不純物を含むn側コンタクト層4、n型不純物を含むn側第1多層膜層105、第1の窒化物半導体膜106a及び第2の窒化物半導体膜106bよりなるn側第2多層膜層6からなり、p側領域30は、多層膜又は単層からなるp側クラッド層108とMgドープp側GaNコンタクト層9とからなる。また、実施の形態2の窒化物半導体素子において、n側コンタクト層4上にn電極12、p側GaNコンタクト層9上にp電極11がそれぞれ形成されている。

尚、図4には、p側クラッド層108として、第3の窒化物半導体108a及び第4の窒化物半導体膜108bが積層された多層膜を用いた例を示している。

本発明において、基板1としては、サファイアC面、R面又はA面を主面とするサファイア、その他、スピネル(MgAl₂O₄)のような絶縁性の基板の他、SiC(6H、4H、3Cを含む)、Si、ZnO、GaAs、GaN等の半導体基板を用いることができる。

本発明において、バッファ層102としては、Ga_dAl_{1-d}N(但しdは0<d≤1の範囲である。)からなる窒化物半導体であり、好ましくはAlの割合が小さい組成ほど結晶性の改善が顕著となり、より好ましくはGaNからなるバッファ層102が挙げられる。

バッファ層102の膜厚は、 $0.002 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、好ましくは $0.005 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 、更に好ましくは $0.01 \sim 0.02 \mu\text{m}$ の範囲に調整する。バッファ層102の膜厚が上記範囲であると、窒化物半導体の結晶モフォロジーが良好となり、バッファ層102上に成長させる窒化物半導体の結晶性が改善される。

- 5 バッファ層102の成長温度は、 $200 \sim 900^\circ\text{C}$ であり、好ましくは $400 \sim 800^\circ\text{C}$ の範囲に調整する。成長温度が上記範囲であると良好な多結晶となり、この多結晶が種結晶としてバッファ層102上に成長させる窒化物半導体の結晶性を良好にでき好ましい。

- 10 また、このような低温で成長させるバッファ層102は、基板の種類、成長方法等によっては省略してもよい。

- 次に、本実施の形態2において、アンドープGaN層103は、成長する際にn型不純物を添加せずに成長してなる層である。バッファ層102上にこのアンドープGaN層103を成長させるとアンドープGaN層103の結晶性が良好となり、アンドープGaN層103上に成長させるn側コンタクト層4などの結晶性を良好にできる。アンドープGaN層103の膜厚は、 $0.01 \mu\text{m}$ 以上とし、好ましくは $0.5 \mu\text{m}$ 以上であり、より好ましくは $1 \mu\text{m}$ 以上である。膜厚がこの範囲であると、n側コンタクト層4以降の層を結晶性良く成長でき好ましい。またアンドープGaN層103の膜厚の上限は特に限定されないが、製造効率等を考慮して適宜調整される。

- 20 次に、本実施の形態2において、n型不純物を含むn側コンタクト層4は、n型不純物を $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以上、好ましくは $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以上の濃度で含有する。このようにn型不純物を多くドーピングして、この層をn側コンタクト層として用いると、V_f及び閾値を低下させることができる。不純物濃度が上記範囲を逸脱するとV_fが低下しにくくなる傾向がある。また、n側コンタクト層4は、n型不純物濃度が小さい結晶性の良好なアンドープGaN層103上に形成され、高濃度のn型不純物を有しているにも関わらず結晶性を良好に形成することができる。本発明は、n側コンタクト層4のn型不純物濃度の上限により特に限定されるものではないが、良好なコンタクト層としての機能を保持するための結晶性を保つためには $5 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 以下とすること望ましい。
- 25

n側コンタクト層4の組成は、 $In_eAl_fGa_{1-e-f}N$ ($0 \leq e$ 、 $0 \leq f$ 、 $e + f \leq 1$) で構成でき、その組成は特に問うものではないが、 GaN 、又は f 値 0.2 以下の $Al_fGa_{1-f}N$ とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすいので好ましい。n側コンタクト層4の膜厚は特に問うものではないが、n電極を形成する層であるので 0.1 ~ 20 μm 、好ましくは 0.5 ~ 10 μm 、より好ましくは 1 ~ 5 μm とする。膜厚が上記範囲であると抵抗値を低くでき、発光素子の順方向電圧を低くでき好ましい。

また、n側コンタクト層4は、後述のn側第1多層膜層105を比較的厚い膜に形成してコンタクト層として用いる場合は、省略することができる。

次に、本実施の形態2において、n側第1多層膜層105は、n型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされているバンドギャップエネルギーが異なる又はn型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされている同一組成を有する少なくとも2種類の窒化物半導体層が積層されてなる多層膜からなる。n側第1多層膜層105の膜厚は、2 μm 以下であり、好ましくは 1.5 μm 以下であり、より好ましくは 0.9 μm 以下である。膜厚がこの範囲であると、発光出力を向上させるのに好ましい。また下限は特に限定されないが、例えば 0.05 μm 以上である。

上記多層膜層を構成する窒化物半導体層の互いの不純物濃度が異なることを変調ドーピングといい、この場合、一方の層が不純物をドーピングしない状態、つまりアンドーピングが好ましい。

まず、以下にn側第1多層膜層105が、互いにバンドギャップエネルギーが異なる少なくとも2種類の窒化物半導体層を積層してなる多層膜である場合について説明する。

n側第1多層膜層105の多層膜層を構成するバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層105a及びバンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層105bの膜厚は、100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは10~40オングストロームの範囲の膜厚に調整する。100オングストロームよりも厚いと、バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層及びバンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層が弾性歪み限界以上の膜厚となり、膜中に微少なクラック、あるいは結晶欠陥が

入りやすい傾向にある。バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層、バンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層の膜厚の下限は特に限定されるものではなく、1原子層以上であればよいが、前記のように10オングストローム以上が最も好ましい。

- 5 上記のようにn側第1多層膜層105が、それぞれの膜厚の薄い多層膜構造とすると、その多層膜層を構成する窒化物半導体層の各膜厚を弾性臨界膜厚以下とすることができ、結晶欠陥の非常に少ない窒化物半導体が成長できる。さらに、この多層膜層で基板からアンドープGaN層103やn側コンタクト層4を通つて発生している結晶欠陥をある程度止めることができ、多層膜層の上に成長させるn側第2多層膜層106の結晶性を良くすることができる。さらにHEMTに類似した効果もある。

- 15 バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層105aは、少なくともAlを含む窒化物半導体、好ましくは $\text{Al}_g\text{Ga}_{1-g}\text{N}$ ($0 < g \leq 1$) を成長させる方が望ましい。一方、バンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体105bはバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体105aよりもバンドギャップエネルギーが小さい窒化物半導体であればどのようなものでも良いが、好ましくは $\text{Al}_h\text{Ga}_{1-h}\text{N}$ ($0 \leq h < 1, g > h$)、 $\text{In}_j\text{Ga}_{1-j}\text{N}$ ($0 \leq j < 1$) のような2元混晶、3元混晶の窒化物半導体が成長させやすく、また結晶性の良いものが得られやすい。その中でも特に好ましくはバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体105aは実質的にInを含まない $\text{Al}_g\text{Ga}_{1-g}\text{N}$ ($0 < g < 1$) とし、バンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体105bは実質的にAlを含まない $\text{In}_j\text{Ga}_{1-j}\text{N}$ ($0 \leq j < 1$) とし、中でも結晶性に優れた多層膜を得る目的で、Alの混晶比(g値)が0.3以下の $\text{Al}_g\text{Ga}_{1-g}\text{N}$ ($0 < g \leq 0.3$) と、GaNの組み合わせが最も好ましい。

- 25 また、n側第1多層膜層105を、光閉じ込め層、及びキャリア閉じ込め層としてクラッド層として機能させる場合、活性層の井戸層よりもバンドギャップエネルギーの大きい窒化物半導体を成長させる必要がある。バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層とは、即ちAl混晶比の高い窒化物半導体である。従来ではAl混晶比の高い窒化物半導体を厚膜で成長させると、クラックが入り

やすくなるため、結晶成長が非常に難しかった。しかしながら本発明のようにn側第1多層膜層105を多層膜層にすると、多層膜層を構成する個々の窒化物半導体層(105a, 105b)をAl混晶比の多少高い層としても、弾性臨界膜厚以下の膜厚で成長させているのでクラックが入りにくい。そのため、Al混晶比の高い層を結晶性良く成長できることにより、光閉じ込め、キャリア閉じ込め効果を高くでき、レーザ素子では閾値電圧、LED素子ではV_f(順方向電圧)を低下させることができる。

さらに、このn側第1多層膜層105のバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層105aとバンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層105bとの間のn型不純物濃度は異なることが好ましい。これはいわゆる変調ドーブと呼ばれるもので、一方の層のn型不純物濃度を小さく、好ましくは不純物をドーブしない状態(アンドーブ)として、もう一方を高濃度にドーブすると、閾値電圧、V_f等を低下させることができる。これは不純物濃度の低い層を多層膜層中に存在させることにより、その層の移動度が大きくなり、また不純物濃度が高濃度の層も同時に存在することにより、キャリア濃度が高いままで多層膜層が形成できることによる。つまり、不純物濃度が低い移動度の高い層と、不純物濃度が高いキャリア濃度が大きい層とが同時に存在することにより、キャリア濃度が大きく、移動度も大きい層がクラッド層となるために、閾値電圧、V_fが低下すると推察される。

バンドギャップエネルギーが大きい窒化物半導体層105aにn型不純物を多くドーブする場合、バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層105aへの好ましいドーブ量としては、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 、さらに好ましくは $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲に調整する。 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも少ないと、バンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層との差が少なくなつて、キャリア濃度の大きい層が得られにくい傾向にあり、また $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ よりも多いと、素子自体のリーク電流が多くなりやすい傾向にある。一方、バンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層のn型不純物濃度はバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層よりも少なければ良く、好ましくは1/10以上少ない方が望ましい。最も好ましくはアンドーブとすると最も移動度

の高い層が得られるが、膜厚が薄いため、バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体側から拡散してくるn型不純物があり、その量は $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 以下が望ましい。n型不純物としてはSi、Ge、Se、S、O等の周期律表第IVB族、VIB族元素を選択し、好ましくはSi、Ge、Sをn型不純物とする。

5 この作用は、バンドギャップエネルギーが大きい窒化物半導体層にn型不純物を少なくドーピングして、バンドギャップエネルギーが小さい窒化物半導体層にn型不純物を多くドーピングする場合も同様である。

以上、多層膜層に不純物を好ましく変調ドーピングする場合について述べたが、バンドギャップエネルギーが大きい窒化物半導体層105aとバンドギャップエネルギーが小さい窒化物半導体層105bとの不純物濃度を等しくすることもできる。

さらにまたn側第1多層膜層105の多層膜を構成する窒化物半導体層105a、105bにおいて、不純物が高濃度にドーピングされる層は、厚さ方向に対し、半導体層中心部近傍の不純物濃度が大きく、両端部近傍の不純物濃度が小さい
15 (好ましくはアンドーピング)とすることが望ましい。具体的に説明すると、例えばn型不純物としてSiをドーピングしたAlGaInと、アンドーピングのGaIn層とで多層膜層を形成した場合、AlGaInはSiをドーピングしているのでドナーとして電子を伝導帯に出すが、電子はポテンシャルの低いGaInの伝導帯に落ちる。GaIn結晶中にはドナー不純物をドーピングしていないので、不純物によるキャリアの散
20 乱を受けない。そのため電子は容易にGaIn結晶中を動くことができ、実質的な電子の移動度が高くなる。これは二次元電子ガスの効果と類似しており、電子横方向の実質的な移動度が高くなり、抵抗率が小さくなる。さらに、バンドギャップエネルギーの大きいAlGaInの中心領域にn型不純物を高濃度にドーピングすると効果はさらに大きくなる。即ちGaIn中を移動する電子によっては、AlGaIn中に含まれるn型不純物イオン(この場合Si)の散乱を多少とも受ける。し
25 かしAlGaIn層の厚さ方向に対して両端部をアンドーピングとするとSiの散乱を受けにくくなるので、さらにアンドーピングGaIn層の移動度が向上するのである。

次に、n側第1多層膜層105が、同一組成の窒化物半導体層が積層されてなり、n型不純物がそれら窒化物半導体層間で異なる濃度でドーピングされている場合

について説明する。

まず、n側第1多層膜層105を構成する窒化物半導体としては、特に特定の組成に限定されるものではなく、同一組成であればよいが、好ましい材料としてはGa₂Nが挙げられる。n側第1多層膜層105がGa₂Nで構成されていると、
5 2元混晶であるGa₂Nは3元混晶のものより結晶性良く成長でき、以降に成長させる窒化物半導体の結晶性も良好にできる。

本実施の形態2において、n側第1多層膜層105は、n型不純物を含むGa₂Nからなる窒化物半導体層105aとその窒化物半導体層105aとは異なるn型不純物濃度を有するGa₂Nからなる窒化物半導体層105bとを積層してなる
10 多層膜を用いることができる。この場合、窒化物半導体層105a、105bのうち、どちらか一方はアンドープであることが好ましい。

このように同一組成であって互いにn型不純物のドーピング量が異なるように変調ドーピングされた2種類の窒化物半導体層からなるn側第1多層膜層を用いても、バンドギャップエネルギーが異なりかつ変調ドーピングされた少なくとも2種類の層から構成されるn側第1多層膜層105の場合と同様の作用効果が得られる。
15

n側不純物の濃度は $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 、好ましくは $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 、より好ましくは $3 \times 10^{18} \sim 7 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ である。また、本発明において、n側第1多層膜層105の総膜厚は、特に限定されるものではないが、1000～4000オングストローム、好ましくは2000～3000
20 オングストロームとする。また多層膜を構成する各層の膜厚は500オングストローム以下、好ましくは200オングストローム以下、より好ましくは100オングストローム以下とする。また、多層膜を構成する各層の膜厚の下限は特に限定されるものではなく、1原子層以上であればよいが、10オングストローム以上とすることが好ましい。上記のような膜厚であると、結晶性良く成長させるこ
25 とができ、発光出力を向上させることができる。

また、以上説明した、バンドギャップエネルギーの異なる又は同一組成で更に不純物濃度の異なる2種類以上の層からなるn側第1多層膜層105は、n側コンタクト層を兼ねることができる。この場合、n側第1多層膜層105の膜厚は、
0.5～4μm、好ましくは1～3μm、より好ましくは2～2.8μmとする。

この場合のn側第1多層膜層105の膜厚は、上記の少なくとも2種類以上の窒化物半導体層の積層数及び/又は各膜厚により調整される。また、この場合のn側第1多層膜層105を構成する各膜厚は、上記範囲の薄膜層の多層膜層としてもよく、また全体としての膜厚がn側コンタクト層を兼ねる場合のn側第1多層膜層105の上記膜厚の範囲であれば各膜厚が上記範囲を超える2種類以上の窒化物半導体により調整してもよい。

また、本実施の形態2では、図4に示すように、活性層7の下部に位置するn側領域130に、Inを含む第1の窒化物半導体膜106aと、その第1の窒化物半導体膜106aと異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜106bとが積層されたn側第2多層膜層106を有している。n側第2多層膜層106において、第1の窒化物半導体膜106a、第2の窒化物半導体膜106bはそれぞれ少なくとも一層以上形成し、合計で2層以上、好ましくは3層以上、さらに好ましくはそれぞれ少なくとも2層以上積層し合計で4層以上積層することが望ましい。

n側第2多層膜層106が活性層7に接して形成されている場合、活性層7の最初の層（井戸層、若しくは障壁層）と接する層は第1の窒化物半導体膜106aでも、第2の窒化物半導体膜106bいずれでも良く、n側第2多層膜層106の積層順序は特に問うものではない。なお、図4ではn側第2多層膜層106が、活性層7に接して形成されているが、このn側第2多層膜層106と活性層7との間に、他のn型窒化物半導体よりなる層を有していても良い。

本実施の形態2において、n側第2多層膜層106において、前記第1の窒化物半導体膜106a、または前記第2の窒化物半導体膜106bの内の少なくとも一方の膜厚が100オングストローム以下とすることが好ましい。また、より好ましくは第1の窒化物半導体膜106aおよび第2の窒化物半導体膜106bの両方を100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下にする。このように膜厚を薄くすることにより、n側第2多層膜層106が超格子構造となつて、n側第2多層膜層106の結晶性を良くできるので、出力を向上させることができる。

このように、前記n側第1多層膜層105と、上記n側第2多層膜層106と

を組み合わせると、発光出力をより向上させることができ、順方向電圧（ V_f ）をより低下させることができ、好ましい。この理由は定かではないが、 n 側第2多層膜層106上に成長させる活性層の結晶性をより良好とできるためと考えられる。

- 5 第1の窒化物半導体膜は In を含む窒化物半導体、好ましくは3元混晶の $In_kGa_{1-k}N$ （ $0 < k < 1$ ）とし、さらに好ましくは k 値が0.5以下の $In_kGa_{1-k}N$ 、最も好ましくは k 値が0.2以下の $In_kGa_{1-k}N$ とする。一方、第2の窒化物半導体膜は第1の窒化物半導体膜と組成が異なる窒化物半導体であれば良く、特に限定しないが、結晶性の良い第2の窒化物半導体を成長させるためには、
- 10 第1の窒化物半導体よりもバンドギャップエネルギーが大きい2元混晶あるいは3元混晶の窒化物半導体を成長させる。 n 側第2多層膜層106において、第2の窒化物半導体膜106bは好ましくは $In_mGa_{1-m}N$ （ $0 \leq m < 1$ 、 $m < k$ ）とし、全体に結晶性の良い多層膜層を成長させるために、最も好ましくは GaN とする。従って、最も好ましい組み合わせは、第1の窒化物半導体膜として k 値
- 15 が0.5以下の $In_kGa_{1-k}N$ を用い、第2の窒化物半導体膜として GaN を用いた組み合わせである。

- さらに、前記第1の窒化物半導体膜106aまたは前記第2の窒化物半導体膜106bの内の少なくとも一方の膜厚が、近接する第1の窒化物半導体膜106aまたは第2の窒化物半導体膜106b同士で互いに異なっても、同一でもよい。
- 20 また、膜厚が近接する層同士で互いに異なるとは、第1の窒化物半導体膜106aまたは第2の窒化物半導体膜106bを複数層積層した多層膜層を形成した場合に、第2の窒化物半導体膜106b（第1の窒化物半導体膜106a）を挟んだ第1の窒化物半導体膜106a（第2の窒化物半導体膜106b）の膜厚が互いに異なることを意味する。

- 25 例えば第1の窒化物半導体膜106aを $InGaN$ とし、第2の窒化物半導体膜106bを GaN とした場合、 GaN 層と GaN 層との間の $InGaN$ 層の膜厚を、活性層に接近するに従って次第に厚くしたり、また薄くしたりすることにより、多層膜層内部において屈折率が変化するため、実質的に屈折率が次第に変化する層を形成することができる。即ち、実質的に組成傾斜した窒化物半導体層

を形成するのと同じ効果が得られる。このため例えばレーザ素子のような光導波路を必要とする素子においては、この多層膜層で導波路を形成して、レーザ光のモードを調整できる。

さらにまた、前記第1の窒化物半導体膜106a、または前記第2の窒化物半導体膜106bの内の少なくとも一方のIII族元素の組成が、近接する第1の窒化物半導体膜106aまたは第2の窒化物半導体膜106bの同一III族元素の組成同士で互いに異なってもよい。このことは、第1の窒化物半導体膜106aまたは第2の窒化物半導体膜106bを複数層積層した多層膜層を形成した場合に、第2の窒化物半導体膜106b（第1の窒化物半導体膜106a）を挟んだ第1の窒化物半導体膜106a（第2の窒化物半導体膜106b）のIII族元素の組成比が互いに異なることを意味する。

例えば、同一III族元素の組成同士で互いに異ならせると、第1の窒化物半導体膜106aをInGa_xNとし、第2の窒化物半導体膜106bをGa_{1-x}Nとした場合、Ga_{1-x}N層とGa_{1-x}N層との間のInGa_xN層のIn組成を活性層に接近するに従って次第に多くしたり、また少なくしたりすることにより、前述の態様と同じく、多層膜層内部において屈折率を変化させて、実質的に組成傾斜した窒化物半導体層を形成することができる。なおIn組成が減少するに従い、屈折率は小さくなる傾向にある。

n側第2多層膜層106は、活性層と離間して形成されていても良いが、最も好ましくは活性層に接して形成されているようにする。活性層に接して形成する方がより出力が向上しやすい傾向にある。

また、n側第2多層膜層106において、第1の窒化物半導体膜106a及び第2の窒化物半導体膜106bは両方ともアンドープでも良いし、両方にn型不純物がドーピングされていても良いし、またいずれか一方に不純物がドーピングされていてもよい。結晶性を良くし出力を向上させるためには、アンドープが最も好ましく、次に第1の窒化物半導体膜106aまたは第2の窒化物半導体膜106bのいずれか一方に、n型不純物がドーピングされた変調ドーピング、その次に両方ドーピングの順である。

尚、両方にn型不純物をドーピングする場合、第1の窒化物半導体膜106aのn

型不純物濃度と、第2の窒化物半導体膜106bのn型不純物濃度は異なっている。でも良い。

尚、n型不純物としては、好ましくは、Si、Ge、Sn、S等のIV族、VI族元素を選択し、さらに好ましくはSi、Snを用いる。

5 ここで、アンドープとは意図的に不純物をドーピングしない状態を指し、例えば隣接する窒化物半導体層から拡散により混入される不純物も本発明ではアンドープという。なお拡散により混入される不純物は層内において不純物濃度に勾配がついていることが多い。

10 また、第1の窒化物半導体膜106aおよび／又は第2の窒化物半導体膜106bにn型不純物をドーピングする場合、不純物濃度は $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 以下、好ましくは $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以下に調整する。 $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ よりも多いと窒化物半導体層の結晶性が悪くなって、逆に出力が低下する傾向にある。これは変調ドーピングの場合も同様である。

15 さらに、n側第2多層膜層106において、第1および第2の窒化物半導体膜の膜厚を100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、より好ましくは50オングストローム以下にする。単一窒化物半導体層の膜厚を100オングストローム以下とすることにより、窒化物半導体単一層の弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長できる。また、両方を70オングストローム以下にすることによって、n側
20 第2多層膜層6が超格子（多層膜）構造となり、この結晶性の良い多層膜構造の上に活性層を成長させると、n側第2多層膜層6がバッファ層のような作用をして、活性層が結晶性よく成長できる。

25 本実施の形態2において、多重量子井戸構造の活性層7は、In及びGaを含む窒化物半導体、好ましくは、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) で形成され、n型、p型いずれでもよいが、アンドープ（不純物無添加）とすることにより強いバンド間発光が得られ発光波長の半値幅が狭くなり好ましい。活性層7にn型不純物及び／又はp型不純物をドーピングしてもよい。活性層7にn型不純物をドーピングするとアンドープのものに比べてバンド間発光強度をさらに強くすることができる。活性層7にp型不純物をドーピングするとバンド間発光のピーク波長よりも約

0.5 eV低いエネルギー側にピーク波長をシフトさせることができるが、半値幅は広がる。活性層にp型不純物とn型不純物との双方をドーピングすると、前述したp型不純物のみドーピングした活性層の発光強度をさらに大きくすることができる。特にp型ドーパントをドーピングした活性層を形成する場合、活性層の導電型はSi等のn型ドーパントをもドーピングして全体をn型とすることが好ましい。結晶性のよい活性層を成長させるには、ノンドーピングが最も好ましい。

活性層7の障壁層と井戸層との積層順は、特に問わず、井戸層から積層して井戸層で終わってもよいし、井戸層から積層して障壁層で終わってもよい。また、障壁層から積層して障壁層で終わってもよいし、また障壁層から積層して井戸層で終わってもよい。井戸層の膜厚としては100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、さらに好ましくは50オングストローム以下に調整する。本発明において、井戸層の膜厚の下限は、特に限定されるものではないが、1原子層以上、好ましくは10オングストローム以上とする。井戸層が100オングストロームよりも厚いと、出力が向上しにくい傾向にある。

一方、障壁層の厚さは2000オングストローム以下、好ましくは500オングストローム以下、より好ましくは300オングストローム以下に調整する。本発明は、障壁層の膜厚の下限には特に限定されないが、1原子層以上、好ましくは10オングストローム以上とする。障壁層が上記範囲であると出力が向上し易く好ましい。さらに、本発明は、活性層7全体の膜厚には特に限定されるものではなく、LED素子などの希望の波長等を考慮して、障壁層及び井戸層の各積層数や積層順を調整し活性層7の総膜厚を調整する。

本実施の形態2において、p側クラッド層は、バンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体膜108aと、第3の窒化物半導体膜108aよりもバンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体膜108bとが積層されて、互いのp型不純物濃度が異なる若しくは同一のp側多層膜クラッド層108とした。しかしながら、本発明では、p型不純物を含有する $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 \leq b \leq 1$) からなる単一層としてもよい。

まず、p側クラッド層が多層膜構造（超格子構造）を有するp側多層膜クラッド層108の場合について以下に説明する。

p側多層膜クラッド層108の多層膜層を構成する第3の窒化物半導体膜108a及び第4の窒化物半導体膜108bの膜厚は、100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは10～40オングストロームの膜厚に調整され、第3の窒化物半導体膜108aと第4の窒化物半導体膜108bとの膜厚は、同一でも異なってもよい。多層膜構造の各膜厚が上記範囲であると、各窒化物半導体の膜厚が弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長でき、また窒化物半導体層の結晶性が良くなるので、p型不純物を添加した場合にキャリア濃度が大きく抵抗率の小さいp層が得られ、素子のV_f、しきい値が低下し易い傾向にある。このような膜厚の2種類の層を1ペアとして複数回積層して多層膜層を形成する。そして、p側多層膜クラッド層108の総膜厚の調整は、この第3及び第4の窒化物半導体膜の各膜厚を調整し積層回数を調整することにより行う。p側多層膜クラッド層108の総膜厚は、特に限定されないが、2000オングストローム以下、好ましくは1000オングストローム以下、より好ましくは500オングストローム以下とし、総膜厚がこの範囲であると発光出力を高くでき、順方向電圧(V_f)を低下させることができるので好ましい。

第3の窒化物半導体膜108aは少なくともAlを含む窒化物半導体、好ましくは $Al_nGa_{1-n}N$ ($0 < n \leq 1$)を成長させることが望ましく、第4の窒化物半導体108bは好ましくは $Al_pGa_{1-p}N$ ($0 \leq p < 1$, $n > p$)、 $In_rGa_{1-r}N$ ($0 \leq r \leq 1$)のような2元混晶、3元混晶の窒化物半導体を成長させることが望ましい。

p側クラッド層を超格子構造のp側多層膜クラッド層108とすると、結晶性を良くでき、抵抗率を低下させることができ、V_fを低下させることができる。

p側多層膜クラッド層108の第3の窒化物半導体膜108aと第4の窒化物半導体膜108bとのp型不純物濃度は異なり、一方の層の不純物濃度を大きく、もう一方の層の不純物濃度を小さくする。n側第1多層膜層5と同様に、バンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体膜108aのp型不純物濃度を大きくして、バンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体膜108bのp型不純物濃度を小さく又はアンドープとすると、閾値電圧、V_f等を低下さ

せることができる。またその逆でも良い。つまりバンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体膜108aのp型不純物濃度を小さくして、バンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体膜108bのp型不純物濃度を大きくしても良い。

- 5 第3の窒化物半導体膜108aへの好ましいドーブ量としては $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ~ $1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 、さらに好ましくは $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ~ $5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ の範囲に調整する。 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ よりも少ないと、同様に第4の窒化物半導体膜108bとの差が少なくなつて、同様にキャリア濃度の大きい層が得られにくい傾向にあり、また $1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ よりも多いと、結晶性が悪くなる傾向にある。一方、第4の窒化物半導体膜108bのp型不純物濃度は第3の窒化物半導体膜108aよりも少なければ良く、好ましくは1/10以上少ない方が望ましい。最も好ましくはアンドープとすると最も移動度の高い層が得られるが、膜厚が薄いため、第3の窒化物半導体側から拡散してくるp型不純物があり、その量は $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 以下が望ましい。また、バンドギャップエネルギーが大きい第3
- 10 窒化物半導体膜108aにp型不純物を少なくドーブして、バンドギャップエネルギーが小さい第4の窒化物半導体膜108bにp型不純物を多くドーブする場合も同様である。

p型不純物としてはMg、Zn、Ca、Be等の周期律表第IIA族、IIB族元素を選択することができ、好ましくはMg、Ca等をp型不純物とする。

- 20 さらにまた多層膜を構成する窒化物半導体層において、不純物が高濃度にドーブされる層は、厚さ方向に対し、半導体層中心部近傍の不純物濃度が大きく、両端部近傍の不純物濃度が小さい（好ましくはアンドープ）とすることが、抵抗率を低下させるのに望ましい。

- 次に、p側クラッド層が、p型不純物を含み $\text{Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 \leq b \leq 1$)よりなる単一層からなる場合、そのp側単一膜クラッド層の膜厚は、2000オングストローム以下、好ましくは1000オングストローム以下であり、より好ましくは500~100オングストローム以下とする。膜厚が上記範囲であると、発光出力が向上し、Vfが低下し好ましい。p側単一膜クラッド層の組成は、 $\text{Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 \leq b \leq 1$)である。
- 25

また、単一膜層のクラッド層は、前記多層膜構造のp側クラッド層に比べ、結晶性はやや劣るものの、前記n側第1多層膜層105との組み合わせにより、結晶性良く成長させることができ、しきい値やV_fを低下させることができる。更に、このように単一膜としてもその他の層構成と組み合わせることにより素子の性能の低下を少なくし、しかも単一膜であるので、製造工程の簡易化が可能となり、量産する場合に好ましい。

p側単一膜クラッド層のp型不純物の濃度は $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 、好ましくは $5 \times 10^{18} \sim 5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 、より好ましくは $5 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ である。不純物濃度が上記範囲であると、良好なp型膜ができ好ましい。

次に、本実施の形態において、Mgドープp側Ga_{0.9}Al_{0.1}Nコンタクト層9は、単層とする場合、その組成をIn、Alを含まない三元混晶の窒化物半導体とする。単層の場合に、仮にIn、Alを含有していると、p電極11との良好なオーミック接触が得られなくなり、発光効率が低下する。p側コンタクト層9の膜厚は0.001~0.5 μm、好ましくは0.01~0.3 μm、より好ましくは0.05~0.2 μmとする。膜厚が0.001 μmよりも薄いとp型Ga_{0.9}Al_{0.1}Nクラッド層と電氣的に短絡しやすくなり、コンタクト層として作用しにくい。また、三元混晶のGa_{0.9}Al_{0.1}Nクラッド層の上に、組成の異なる三元混晶のGa_{0.9}Nコンタクト層を積層するため、逆にその膜厚を0.5 μmよりも厚くすると、結晶間のミスフィットによる格子欠陥がp側Ga_{0.9}Nコンタクト層9中に発生しやすく、結晶性が低下する傾向にある。なお、コンタクト層の膜厚は薄いほどV_fを低下させ発光効率を向上させることができる。また、このp型Ga_{0.9}Nコンタクト層9のp型不純物はMgであるとp型特性が得られ易く、またオーミック接触が得られ易くなる。Mgの濃度は、 $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 、好ましくは $5 \times 10^{19} \sim 3 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 、より好ましくは $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 程度である。Mg濃度がこの範囲であると良好なp型膜が得られ易く、V_fを低下させることができ好ましい。

また、n電極12はn側コンタクト層4上に、p電極11はMgドープp側Ga_{0.9}Nコンタクト層9上にそれぞれ形成されている。n電極12及びp電極11の材料としては特に限定されるものではないが、例えばn電極12としてはW/AI、p電極11としてはNi/Auなどを用いることができる。

実施の形態3.

以下、図5を参照して本発明に係る実施の形態3について説明する。

本発明に係る実施の形態3の窒化物半導体発光素子は、図5に示すように、例えばサファイアからなる基板1上に、バッファ層202を介して、第1n側窒化物半導体層203、第2n側窒化物半導体層204、第3n側窒化物半導体層205、活性層7、p側クラッド層108及びp側コンタクト層208が順次形成されて構成される。尚、本実施の形態3において、p側コンタクト層208の上面のほぼ前面には、透光性のp電極10が形成され、p電極上の一部にボンディング用のpパット電極11が形成される。また、発光素子の片側において、第2n側窒化物半導体層204の表面が露出され、その露出部分には、n電極12が形成されている。

ここで、実施の形態3の窒化物半導体発光素子において、図5に示すように、バッファ層202、第1n側窒化物半導体層203、第2n側窒化物半導体層204及び第3n側窒化物半導体層205によってn側領域230が構成され、p側クラッド層108及びp側コンタクト層208によってn側領域240が構成される。

ここで、特に本実施の形態3では、p側コンタクト層208が、互いに組成の異なる第1の窒化物半導体膜208aと第2の窒化物半導体膜208bが交互に積層された超格子構造を有し、前記2つの窒化物半導体層のうち少なくとも第1の窒化物半導体膜208aはInを含んでいることを特徴とする。このように、p側コンタクト層208を構成する前記2つの窒化物半導体層のうち少なくとも一方の第1の窒化物半導体膜208aがInを含んでいて、かつ第1と第2の窒化物半導体膜208a、208bとが交互に積層された超格子構造とすることにより、極めて欠陥の少ない結晶性の良好なp側コンタクト層208を形成することができる。これによって、超格子構造でない単層のInGaNからなる従来例に比較して、それ自身の抵抗値が低くかつp電極10と良好なオーミック接触させることができるp側コンタクト層208を形成することができる。

さらに、詳細に説明すると、本実施の形態3において、p側コンタクト層208は例えば、以下の表1に示す第1の窒化物半導体膜208aと第2の窒化物半

導体膜 208b とを組み合わせることにより構成することができる。

【表 1】

	第 1 の窒化物半導体膜 208a	第 2 の窒化物半導体膜 208b
1	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	GaN
2	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	$\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N} \ (x > y)$
3	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	$\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N} \ (0 < z < 1)$

ここで、本実施の形態 3 において、結晶欠陥の少ない第 1 の窒化物半導体膜 8a を形成するために、表 1 の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ は、好ましくは $x < 0.5$ に設定され、より好ましくは $x < 0.4$ 、さらに好ましくは $x < 0.3$ に設定される。

また、本発明において、p 型コンタクト層の膜厚は、厚さが厚いほど厚さ方向の抵抗値が高くなるので、好ましくは $0.1 \mu\text{m}$ 以下、より好ましくは 500 \AA 以下、さらに好ましくは 200 \AA 以下に設定する。また、p 型コンタクト層を構成する第 1 と第 2 の窒化物半導体膜の膜厚はそれぞれ、好ましくは 100 \AA 以下、より好ましくは 70 \AA 以下、さらに好ましくは 50 \AA 以下に設定する。尚、最も好ましくは、 $10 \sim 40 \text{ \AA}$ の範囲に設定する。

p 側コンタクト層 208 を構成する第 1 と第 2 の窒化物半導体膜 208a、208b の膜厚を 100 \AA 以下に設定するのは、第 1 と第 2 の窒化物半導体膜 208a、208b の膜厚が、 100 \AA より厚いと各窒化物半導体層が弾性歪限界以上の膜厚となり、膜中に微小のクラック、あるいは結晶欠陥が入りやすくなり、超格子構造とする効果が効果的に発揮できないからである。また、本発明において、第 1 と第 2 の窒化物半導体膜 208a、208b は、少なくとも 1 原子層以上であればよいが、好ましくは上述のように 10 \AA 以上に設定する。

また、本発明では、第 1 の窒化物半導体膜 208a と第 2 の窒化物半導体膜 208b の少なくともいずれか一方に Mg 等の p 型不純物が添加され、p 側コンタクト層 208 全体として p 型導電性を示すようにすればよい。また、第 1 の窒化物半導体膜 208a 及び第 2 の窒化物半導体膜 208b の双方に p 型不純物をドーピングする場合、一方の窒化物半導体層の p 型不純物濃度を他方の窒化物半導体層の不純物濃度に比較して高くする（以下、変調ドーピングという。）ことが好ましい。

このように、第 1 と第 2 の窒化物半導体膜 208a、208b のうち、一方の不純物濃度を他方に比較して高く設定することにより、不純物濃度が高い一方の

窒化物半導体層においてキャリア多く発生させることができ、不純物濃度の低い他方の窒化物半導体層における移動度を一方の窒化物半導体層に比較して高くできる。これによって、第1と第2の窒化物半導体膜208a, 208bとが積層された超格子層全体としてのキャリア濃度と移動度とをともに高くできるので、
5 p側コンタクト層208の抵抗値を低くできる。従って、本実施の形態3の窒化物半導体発光素子は、p側コンタクト層208においてさらに、上述のような変調ドーピングをすることにより、所定の電流値における順方向電圧を低くできる。

また、上述のように変調ドーピングする場合、一方の窒化物半導体層には $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ の範囲のp型不純物をドーピングし、他方の窒化物半導体層は $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲であってかつ一方の窒化物半導体層より少ない量のp型不純物がドーピングされていることが好ましい。
10 窒化物半導体層に対して $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ より多い量のp型不純物を添加すると、結晶性が悪化して抵抗値が高くなりかつ良好なオーミック接触を得ることが難しくなるからであり、 $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ より少ないと十分なキャリア濃度が得られず出力が低下するからである。
15

また、本発明において、p側コンタクト層208において、第1の窒化物半導体膜208a又は第2の窒化物半導体膜208bのいずれの層を最上層にしてもよく、いずれの層でp側クラッド層108と接するようにしても良い。しかしながら、本発明では、Inを含む第1の窒化物半導体膜8aを最上層にし、その第1の窒化物半導体膜8aの上にp電極を形成するように構成することが好ましい。
20 このようにすることで、p側コンタクト層208とp電極とのオーミック接触抵抗を小さくできる。

すなわち、第1の窒化物半導体膜208aは、Inを含んでいる分又はInを多く含んでいる分、第2の窒化物半導体膜208bに比較してバンドギャップを小さくすることができ、p電極を構成する金属の伝導帯の下端のエネルギー準位と、第1の窒化物半導体膜208aの価電子帯の上端のエネルギー準位との差を小さくできるので、オーミック接触抵抗を小さくできる。
25

また、実施の形態3の窒化物半導体発光素子においては、前記p型クラッド層は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) からなる層と $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0 \leq y <$

1) からなる層とが交互に積層された超格子構造を有することが好ましい。この p 型クラッド層を構成する各層の膜厚は、好ましくは弾性歪限界の 100 \AA 以下に設定し、より好ましくは 70 \AA 以下、さらに好ましくは 50 \AA 以下に設定する。尚、最も好ましくは、 $10 \sim 40 \text{ \AA}$ の範囲に設定する。このように p 型クラッド層を超格子構造とすることにより、p 型クラッド層の抵抗値を低くすることができる。尚、p 側クラッド層 108 の全体としての膜厚は、好ましくは 100 \AA 以上で $2 \mu\text{m}$ 以下、さらに好ましくは 500 \AA 以上で $1 \mu\text{m}$ 以下に設定される。このような膜厚に設定することにより、良好なキャリア閉じ込め層として動作させ、かつ p 側クラッド層 108 の全体としての抵抗値を比較的低くできる。

実施の形態 4.

本発明に係る実施の形態 4 の窒化物半導体素子は、図 6 A に示すように、p 側コンタクト層 208 においてさらに、第 1 の窒化物半導体膜 208 a と第 2 の窒化物半導体膜 208 b との間に組成傾斜層 208 c を形成した点で、実施の形態 3 と異なる他は、実施の形態 3 と同様に構成される。ここで、組成傾斜層 208 c とは、第 1 の窒化物半導体膜 208 a の組成から第 2 の窒化物半導体膜 208 b の組成へと、除除に変化するように厚さ方向に組成を連続的に変化させた層をいう。例えば、第 1 の窒化物半導体膜 208 a を $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ とし第 2 の窒化物半導体膜 208 b を GaN とした場合、組成傾斜層 208 c は、図 6 B に示すように、第 1 の窒化物半導体膜 208 a に接する面から第 2 の窒化物半導体膜 208 b に接する面に向かって厚さ方向に、 In の組成比 (x) が徐々に減少する層とする。尚、本実施の形態 2 において、組成傾斜層 208 c は、その組成比が徐々に減少する層であればよく、必ずしも図 6 B に示すように、厚さに対して組成が直線的に変化する必要はない。

以上のように構成された実施の形態 2 の窒化物半導体素子は、第 1 の窒化物半導体膜 208 a と第 2 の窒化物半導体膜 208 b との境界で組成が不連続に変化していないので、層の成長時に第 1 の窒化物半導体膜 208 a と第 2 の窒化物半導体膜 208 b の境界において特定の元素の偏析を防止できる。このように、特定の元素の偏析を防止できる結果、結晶欠陥のより少ない第 1 の窒化物半導体膜 208 a と第 2 の窒化物半導体膜 208 b とを成長させることができる。

上述の第1の窒化物半導体膜208aを $In_xGa_{1-x}N$ とし第2の窒化物半導体膜208bを GaN とした例では、第1の窒化物半導体膜208aと第2の窒化物半導体膜208bとの間における In の偏析を防止することができ、結晶性を良好にできる。

5 実施の形態5.

以下に本発明に係る実施の形態5の窒化物半導体素子について、その模式的断面図である図8を用いて説明する。

実施の形態5の窒化物半導体素子は、図8に示すように、基板1上に、バッファ層102、アンドープ GaN 層103、 n 型不純物を含む n 側コンタクト層4、
10 アンドープの下層305a、 n 型不純物ドーパントの中間層305b及びアンドープの上層305cの3層からなる n 側第1多層膜層305、第1の窒化物半導体膜306a及び第2の窒化物半導体膜306bよりなる n 側第2多層膜層306、多重量子井戸構造の活性層7、第3及び第4の窒化物半導体膜からなる p 側多層膜クラッド層8又は p 側単一膜クラッド層8、 Mg ドーパント p 側 GaN コンタクト層9が順に積層された構造を有する。更に n 側コンタクト層4上に n 電極12、
15 p 側 GaN コンタクト層9上に p 電極11がそれぞれ形成されている。

ここで、実施の形態の窒化物半導体素子において、バッファ層102、アンドープ GaN 層103、 n 側コンタクト層4、 n 側第1多層膜層305及び n 側第2多層膜層306によって n 側領域330が構成され、 p 側クラッド層108及び
20 p 側 GaN コンタクト層9によって p 側領域が構成される。

本実施の形態5において、基板1としては、サファイア C 面、 R 面又は A 面を主面とするサファイア、その他、スピネル($MgAl_2O_4$)のような絶縁性の基板の他、 SiC ($6H$ 、 $4H$ 、 $3C$ を含む)、 Si 、 ZnO 、 $GaAs$ 、 GaN 等の半導体基板を用いることができる。

25 本実施の形態5において、バッファ層102としては、 $Ga_dAl_{1-d}N$ (但し d は $0 < d \leq 1$ の範囲である。)からなる窒化物半導体であり、好ましくは Al の割合が小さい組成ほど結晶性の改善が顕著となり、より好ましくは GaN からなるバッファ層102が挙げられる。

バッファ層102の膜厚は、 $0.002 \sim 0.5 \mu m$ 、好ましくは 0.005

～0.2 μm 、更に好ましくは0.01～0.02 μm の範囲に調整する。バッファ層102の膜厚が上記範囲であると、窒化物半導体の結晶モフォロジーが良好となり、バッファ層102上に成長させる窒化物半導体の結晶性が改善される。

5 バッファ層102の成長温度は、200～900℃であり、好ましくは400～800℃の範囲に調整する。成長温度が上記範囲であると良好な多結晶となり、この多結晶が種結晶としてバッファ層102上に成長させる窒化物半導体の結晶性を良好にでき好ましい。

また、このような低温で成長させるバッファ層102は、基板の種類、成長方法等によっては省略してもよい。

10 次に、本実施の形態5において、アンドープGaN層103は、成長する際にn型不純物を添加せずに成長してなる層を示す。バッファ層102上にアンドープGaN層103を成長させるとアンドープGaN層103の結晶性が良好となり、アンドープGaN層103上に成長させるn側コンタクト層4などの結晶性も良好となる。アンドープGaN層103の膜厚としては、0.01 μm 以上で
15 あり、好ましくは0.5 μm 以上であり、より好ましくは1 μm 以上である。膜厚がこの範囲であると、n側コンタクト層4以降の層を結晶性良く成長でき好ましい。またアンドープGaN層103の膜厚の上限は特に限定されないが、製造効率等を考慮して適宜調整される。

次に、本実施の形態5において、n型不純物を含むn側コンタクト層4は、n
20 型不純物を $3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上、好ましくは $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上の濃度で含有する。このようにn型不純物を多くドーピングし、この層をn側コンタクト層とすると、Vf及び閾値を低下させることができる。不純物濃度が上記範囲を逸脱するとVfが低下しにくくなる傾向がある。また、n側コンタクト層4は、n型不純物濃度が小さい結晶性の良好なアンドープGaN層103上に形成されると、
25 高濃度のn型不純物を有しているにも関わらず結晶性を良好に形成することができる。n側コンタクト層4のn型不純物濃度の上限は特に限定しないが、コンタクト層としての機能を保持しうる限界としては $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 以下が望ましい。

n側コンタクト層4の組成は、 $\text{In}_e\text{Al}_f\text{Ga}_{1-e-f}\text{N}$ ($0 \leq e$ 、 $0 \leq f$ 、 $e +$

($f \leq 1$) で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくは $\text{Ga}_f\text{N}_{1-f}$ 、 f 値 0.2 以下の $\text{Al}_g\text{Ga}_{1-g}\text{N}$ とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。n 側コンタクト層 4 の膜厚は特に問うものではないが、n 電極を形成する層であるので 0.1 ~ 20 μm 、好ましくは 0.5 ~ 10 μm 、より好ましくは 1 ~ 5 μm である。膜厚が上記範囲であると抵抗値を低くでき、発光素子の V_f を低くでき好ましい。

また、n 側コンタクト層 4 は、後述の n 側第 1 多層膜層 305 を厚膜に形成する場合、省略することができる。

次に、本実施の形態 5 において、n 側第 1 多層膜層 305 は、基板側から、アンドープの下層 305a、n 型不純物ドーパの間層 305b、アンドープの上層 305c の少なくとも 3 層から構成されている。

n 側第 1 多層膜層 305 を構成する各層は、各々単独では静電耐圧等の素子特性に直接影響を及ぼさない場合もあるが、各層を組み合わせて n 側第 1 多層膜層 305 とすることにより、全体としての素子特性、特に発光出力及び静電耐圧を著しく向上させることができるという特有の機能を有するものである。このような効果は、実際に、各層を積層させてなる素子を製造して初めて得られる予想外の効果といえ、言いかえれば、本発明はこのような効果を見出すことにより完成されたものである。

ここで、n 側第 1 多層膜層 305 には上記下層 305a ~ 上層 305c 以外のその他の層を有していてもよい。また n 側第 1 多層膜層 305 は、活性層と接していても、活性層の間に他の層を有していてもよい。

これら下層 305a ~ 上層 305c を構成する窒化物半導体としては、 $\text{In}_g\text{Al}_h\text{Ga}_{1-g-h}\text{N}$ ($0 \leq g < 1$, $0 \leq h < 1$) で表される種々の組成の窒化物半導体を用いることができ、好ましくは Ga_fN からなる組成のものが挙げられる。また第 1 多層膜層 5 の各層は組成が同一でも異なってもよい。

n 側第 1 多層膜層 305 の膜厚は、特に限定されないが、175 ~ 12000 オングストロームであり、好ましくは 1000 ~ 10000 オングストロームであり、より好ましくは 2000 ~ 6000 オングストロームである。第 1 多層膜層 5 の膜厚が上記範囲であると V_f の最適化と静電耐圧の向上の点で好ましい。

上記範囲の膜厚を有する第1多層膜層5の膜厚の調整は、下層305a、中間層305b、及び上層305cの各膜厚を適宜調整して、第1多層膜層5の総膜厚を上記の範囲とすることが好ましい。

5 また、本実施の形態5では、n側第1多層膜層305を構成する下層305a、中間層305b及び上層305cの各膜厚に限定されるものではないが、本発明において、各膜厚の好ましい範囲を見出すために以下の実験検討をおこなった。

(1) 検討1

下層5aの膜厚を3000Åとし、中間層5bの膜厚を350Åとして、上層5cの膜厚を順次変化させたLED素子を作製して、各素子ごと（各膜厚ごと）
10 に順方向電圧、発光出力及び静電耐圧特性を測定した。

その結果を図9A及び図9Bに示す。

(2) 検討2

下層5aの膜厚を3000Åとし、上層5cの膜厚を50Åとして、中間層5bの膜厚を順次変化させたLED素子を作製して、各素子ごと（各膜厚ごと）に
15 順方向電圧、発光出力及び静電耐圧特性を測定した。

その結果を図10A及び図10Bに示す。

(3) 検討3

中間層5bの膜厚を350Åとし、上層5cの膜厚を50Åとして、下層5aの膜厚を順次変化させたLED素子を作製して、各素子ごと（各膜厚ごと）に順
20 方向電圧、発光出力及び静電耐圧特性を測定した。

その結果を図11A及び図11Bに示す。

尚、本検討において作製した各LED素子は、n側第1多層膜層の各膜厚以外は後述する実施例34と同様の条件で作製した。また、図9A～図11Bに示した特性は、実施例34との比較に用いた従来例のLED素子とした。尚、図9A
25 ～図11Bにおいて、P_oは発光出力を示し、V_fは順方向電圧を示す。

以上の検討結果に基づいて考察すると、アンドープの下層305aの膜厚は、100～10000オングストローム、好ましくは500～8000オングストローム、より好ましくは1000～5000オングストロームである。アンドープの下層305aは、図11A及び図11Bに示すように、膜厚を徐々に厚くし

ていくと静電耐圧が上昇していくが、10000オングストローム付近で V_f が急上昇し、一方膜厚を薄くしていくと、 V_f は低下していくが、静電耐圧の低下が大きくなり、100オングストローム未満では静電耐圧の低下に伴い歩留まりの低下が大きくなる傾向が見られるからである。

5 また、上層5aは、n型不純物を含むn側コンタクト層4の結晶性の低下の影響を改善していると考えられるので、結晶性の改善が良好となる程度の膜厚で成長されるのが好ましい。

 n型不純物ドーブの中間層305bの膜厚は、50～1000オングストローム、好ましくは100～500オングストローム、より好ましくは150～400オングストロームである。この不純物がドーブされた中間層305bは、キャリア濃度を十分とさせて発光出力に比較的大きく作用する層であり、この層を形成させないと著しく発光出力が低下する傾向がある。なお、図10Aでは、膜厚を25オングストローム程度まで薄くしても発光出力の低下がやや下降する程度となっているのは、中間層305bの膜厚が50オングストロームでも発光出力
10 が低下しないように考慮してその他の層の膜厚等を調整して行ったからである。
15 また、図10Aに示されるように、膜厚が1000オングストロームを超えると発光出力が大きく低下する傾向がある。一方、静電耐圧のみを見ると、図10Bに示されるように、中間層305bの膜厚が厚いと静電耐圧は良好であるが、膜厚が50オングストローム未満では静電耐圧の低下が大きくなる傾向がある。

20 アンドープの上層305cの膜厚は、25～1000オングストローム、好ましくは25～500オングストローム、より好ましくは25～150オングストロームである。このアンドープの上層305cは、第1多層膜の中で活性層に接してあるいは最も接近して形成され、リーク電流の防止に大きく関与しているが、上層305cの膜厚が25オングストローム未満ではリーク電流が増加する傾向
25 がある。また、図9A及び図9Bに示されるように、上層305cの膜厚が1000オングストロームを超えると V_f が上昇し静電耐圧も低下する。

 以上のように、下層305a～上層305cの各膜厚は、上記に示したように、各層の膜厚の変動により影響されやすい素子特性に注目し、更に、下層305a、中間層305b及び上層305cを組み合わせる際に、諸素子特性すべてがほぼ

均一に良好となり、特に発光出力及び静電耐圧が良好となるように、比較的高い要求の規格を満足できるように上記範囲に各膜厚を規定することにより、より良好な発光出力を得ることができ又商品の信頼性の更なる向上を達成することができる。

- 5 また、第1多層膜層305の各層の膜厚の組み合わせは、発光波長の種類による活性層の組成の変化や、電極、LED素子の形状など種々の条件により、最も良好な効果を得るために適宜調整される。各層の膜厚の組み合わせに伴う性能は、上記範囲の膜厚で適宜組み合わせることにより、従来のものに比べ良好な発光出力及び良好な静電耐圧を得ることができる。

- 10 上記第1多層膜層を構成する各層の組成は、 $\text{In}_g\text{Al}_h\text{Ga}_{1-g-h}\text{N}$ ($0 \leq g < 1$ 、 $0 \leq h < 1$) で表される組成であればよく、各層の組成が同一でも異なってもよく、好ましくはIn及びAlの割合が小さい組成であり、より好ましくはGaNからなる層が好ましい。

- 15 上記第1多層膜層305のn型不純物ドーブの中間層305bのn型不純物のドーブ量は、特に限定されないが、 $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以上、好ましくは $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以上の濃度で含有する。n型不純物の上限としては、特に限定されないが、結晶性が悪くなりすぎない程度の限界としては $5 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 以下が望ましい。第1の多層膜層の中間層の不純物濃度が上記範囲であると、発光出力の向上とVfの低下の点で好ましい。

- 20 n型不純物としてはSi、Ge、Se、S、O等の周期律表第IVB族、第VIB族元素を選択し、好ましくはSi、Ge、Sをn型不純物とする。

また、上記第1多層膜層305の界面においては、それぞれの層及び素子の機能を害しない範囲で両方の層を兼ねる。

- 25 次に、本実施の形態5において、n側第2多層膜層306は、Inを含む第1の窒化物半導体膜306aと、その第1の窒化物半導体膜306aと異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜306bとが積層された多層膜からなる。この第1の窒化物半導体膜306a、または第2の窒化物半導体膜306bの内の少なくとも一方の膜厚が、好ましくは両方の膜厚が、100オングストローム以下、より好ましくは70オングストローム以下、更に好ましくは50オングストローム

ム以下にする。このように膜厚を薄くすることにより、多層膜層が超格子構造となつて、多層膜層の結晶性が良くなるので、出力が向上する傾向にある。

第1の窒化物半導体膜306a又は第2の窒化物半導体膜306bの少なくとも一方の膜厚が、100オングストローム以下であっても、薄膜層が弾性臨界膜厚以下となつて結晶が良くなり、その上に積層する第1の窒化物半導体膜306a、若しくは第2の窒化物半導体膜306bの結晶性が良くなり、多層膜層全体の結晶性が良くなるため、素子の出力が向上する。

また、第1の窒化物半導体膜306a及び第2の窒化物半導体膜306bの膜厚が、共に100オングストローム以下であると、窒化物半導体単一層の弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる場合や、第1の窒化物半導体膜306a又は第2の窒化物半導体膜306bの一方が100オングストローム以下の場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長できる。また、両方を70オングストローム以下にすると、n側第2多層膜層306が超格子構造となり、この結晶性の良い多層膜構造の上に活性層を成長させると、n側第2多層膜層306がバッファ層のような作用をして、活性層がより結晶性よく成長できる。

本実施の形態5において、n側領域330に、前記n側第1多層膜層305と上記n側第2多層膜層306とを組み合わせると、発光出力が向上し、Vfが低下し好ましい。この理由は定かではないが、n側第2多層膜層306上に成長させる活性層の結晶性が良好となるためと考えられる。

また、n側第2多層膜層306の前記第1の窒化物半導体膜306aまたは前記第2の窒化物半導体膜306bの内の少なくとも一方の膜厚は、近接する第1の窒化物半導体膜306aまたは第2の窒化物半導体膜306b同士で互いに異なつても、同一でもよい。好ましくは、第1の窒化物半導体膜306aまたは第2の窒化物半導体膜306bの内の少なくとも一方の膜厚が、近接する第1の窒化物半導体膜306a、または第2の窒化物半導体膜306b同士で互いに異なっていることが好ましい。

膜厚が近接する層同士で互いに異なるとは、第1の窒化物半導体膜306a及び第2の窒化物半導体膜306bを複数層積層した多層膜層を形成した場合に、第2の窒化物半導体膜306b（第1の窒化物半導体膜306a）の膜厚とそれ

を挟んだ第1の窒化物半導体膜306a（第2の窒化物半導体膜306b）の膜厚とが互いに異なることを意味する。

例えば、第1の窒化物半導体膜306aをInGa_nNとし、第2の窒化物半導体膜306bをGa_nNとした場合、Ga_nN層とGa_nN層との間のInGa_nN層の膜厚を、活性層に接近するに従って次第に厚くしたり、また薄くしたりすることにより、多層膜層内部において屈折率が変化するため、実質的に屈折率が次第に変化する層を形成することができる。即ち、実質的に組成傾斜した窒化物半導体層を形成するのと同じ効果が得られる。このため例えばレーザ素子のような光導波路を必要とする素子においては、この多層膜層で導波路を形成して、レーザ光のモードを調整できる。

また、第1、または第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族元素の組成を、近接する第1または第2の窒化物半導体膜の同一III族元素の組成同士で互いに異なる、又は同一でもよい。好ましくは、第1の窒化物半導体膜、または第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族元素の組成が、近接する第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜の同一III族元素の組成同士で互いに異なる。この互いに異なるとは、第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜を複数層積層した多層膜層を形成した場合に、第2の窒化物半導体膜（第1の窒化物半導体膜）のIII族元素の組成比とそれを挟んだ第1の窒化物半導体膜（第2の窒化物半導体膜）のIII族元素の組成比とが互いに異なることを意味する。

例えば、同一III族元素の組成同士で互いに異ならせると、第1の窒化物半導体膜をInGa_nNとし、第2の窒化物半導体膜をGa_nNとした場合、Ga_nN層とGa_nN層との間のInGa_nN層のIn組成を活性層に接近するに従って次第に多くしたり、また少なくしたりすることにより、多層膜層内部において屈折率を変化させて、実質的に組成傾斜した窒化物半導体層を形成することができる。なおIn組成が減少するに従い、屈折率は小さくなる傾向にある。

上記のn側第2多層膜層306は、例えば、図8に示すように、活性層7を挟んで下部にあるn側窒化物半導体層に、Inを含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜とが積層さ

れたn側第2多層膜層306を有している。n側第2多層膜層306において、第1の窒化物半導体膜、第2の窒化物半導体膜はそれぞれ少なくとも一層以上形成し、合計で2層以上、好ましくは3層以上、さらに好ましくはそれぞれ少なくとも2層以上積層し合計で4層以上積層することが望ましい。

- 5 n側第2多層膜層306は、活性層と離間して形成されていても良いが、最も好ましくは活性層に接して形成されているようにする。活性層に接して形成する方がより出力が向上しやすい傾向にある。

 n側第2多層膜層306が活性層に接して形成されている場合、活性層の最初の層（井戸層、若しくは障壁層）と接する多層膜層は第1の窒化物半導体膜でも、
10 第2の窒化物半導体膜いずれでも良く、n側第2多層膜層306の積層順序は特に問うものではない。なお、図8ではn側第2多層膜層306が、活性層7に接して形成されているが、このn側第2多層膜層306と活性層との間に、他のn型窒化物半導体よりなる層を有していても良い。

 第1の窒化物半導体膜はInを含む窒化物半導体、好ましくは3元混晶の $In_kGa_{1-k}N$ （ $0 < k < 1$ ）とし、さらに好ましくはk値が0.5以下の $In_kGa_{1-k}N$ 、最も好ましくはk値が0.2以下の $In_kGa_{1-k}N$ とする。一方、第2の窒化物半導体膜は第1の窒化物半導体膜と組成が異なる窒化物半導体であれば良く、特に限定しないが、結晶性の良い第2の窒化物半導体を成長させるためには、
15 第1の窒化物半導体よりもバンドギャップエネルギーが大きい2元混晶あるいは3元混晶の $In_mGa_{1-m}N$ （ $0 \leq m < 1$ 、 $m < k$ ）を成長させ、好ましくはGaNである。第2の窒化物半導体をGaNとすると、全体に結晶性の良い多層膜層が成長できる。好ましい組み合わせとしては、第1の窒化物半導体を $In_kGa_{1-k}N$ （ $0 < k < 1$ ）とし、第2の窒化物半導体を $In_mGa_{1-m}N$ （ $0 \leq m < 1$ 、 $m < k$ ）、好ましくはGaNとする組み合わせが挙げられる。更に好ましい組み合わせとしては、第1の窒化物半導体膜のk値が0.5以下の $In_kGa_{1-k}N$ であり、第2の窒化物半導体膜がGaNとの組み合わせである。
20 25

 第1および第2の窒化物半導体膜は両方ともアンドープでも、両方にn型不純物がドーピングされていても、またいずれか一方に不純物がドーピング（変調ドーピング）されていてもよい。結晶性を良くするためには、両方がアンドープであることが最

も好ましく、次に変調ドーピング、その次に両方ドーピングの順である。なお両方に n 型不純物をドーピングする場合、第 1 の窒化物半導体膜の n 型不純物濃度と、第 2 の窒化物半導体膜の n 型不純物濃度は異なっても良い。

5 また、第 1 の窒化物半導体膜または第 2 の窒化物半導体膜のいずれか一方に、n 型不純物がドーピングされていることを変調ドーピングと呼ぶが、このような変調ドーピングをすることにより、出力が向上しやすい傾向を有する。

なお n 型不純物としては、Si、Ge、Sn、S 等の IV 族、VI 族元素を好ましく選択し、さらに好ましくは Si、Sn を用いる。

10 n 型不純物をドーピングする場合、不純物濃度は $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 以下、好ましくは $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以下に調整する。 $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ よりも多いと窒化物半導体層の結晶性が悪くなって、逆に出力が低下する傾向にある。これは変調ドーピングの場合も同様である。

本実施の形態 5 において、多重量子井戸構造の活性層 7 は、In 及び Ga を含有する窒化物半導体、好ましくは、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) で形成され、
15 n 型、p 型いずれでもよいが、アンドーピング（不純物無添加）とすることにより強いバンド間発光が得られ発光波長の半値幅が狭くなり好ましい。活性層 7 に n 型不純物及び／又は p 型不純物をドーピングしてもよい。活性層 7 に n 型不純物をドーピングするとアンドーピングのものに比べてバンド間発光強度をさらに強くすることができる。活性層 7 に p 型不純物をドーピングするとバンド間発光のピーク波長よりも約
20 0.5 eV 低いエネルギー側にピーク波長をシフトさせることができるが、半値幅は広くなる。活性層に p 型不純物と n 型不純物との双方をドーピングすると、前述した p 型不純物のみドーピングした活性層の発光強度をさらに大きくすることができる。特に p 型ドーパントをドーピングした活性層を形成する場合、活性層の導電型は Si 等の n 型ドーパントをもドーピングして全体を n 型とすることが好ましい。結晶
25 性のよい活性層を成長させるには、ノンドーピングが最も好ましい。

活性層 7 の障壁層と井戸層との積層順は、特に問わず、井戸層から積層して井戸層で終わる、井戸層から積層して障壁層で終わる、障壁層から積層して障壁層で終わる、また障壁層から積層して井戸層で終わっても良い。井戸層の膜厚としては 100 オングストローム以下、好ましくは 70 オングストローム以下、さら

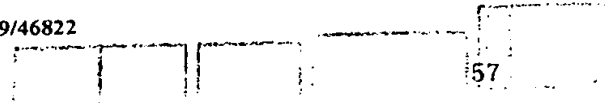
に好ましくは50オングストローム以下に調整する。井戸層の膜厚の上限は、特に限定されないが、1原子層以上、好ましくは10オングストローム以上である。井戸層が100オングストロームよりも厚いと、出力が向上しにくい傾向にある。

一方、障壁層の厚さは2000オングストローム以下、好ましくは500オングストローム以下、より好ましくは300オングストローム以下に調整する。障壁層の膜厚の上限は特に限定されないが、1原子層以上、好ましくは10オングストローム以上である。障壁層が上記範囲であると出力が向上し易く好ましい。また、活性層7全体の膜厚はとくに限定されず、LED素子などの希望の波長を考慮して、障壁層及び井戸層の各積層数や積層順を調整し活性層7の総膜厚を調整する。

本実施の形態5において、p側クラッド層8は、バンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体膜と、第3の窒化物半導体膜よりもバンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体膜とが積層されて、互いのp型不純物濃度が異なる、又は同一の多層膜層、またはp型不純物を含有する $A_1bGa_{1-b}N$ ($0 \leq b \leq 1$) からなる単一層である。

まず、p側クラッド層8が多層膜構造（超格子構造）を有するp側多層膜クラッド層の場合について以下に説明する。

p側多層膜クラッド層17の多層膜層を構成する第3、第4の窒化物半導体膜の膜厚は、100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは10～40オングストロームの膜厚に調整され、第3窒化物半導体層と第4の窒化物半導体膜との膜厚は、同一でも異なってもよい。多層膜構造の各膜厚が上記範囲であると、窒化物半導体の弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長でき、また窒化物半導体層の結晶性が良くなるので、p型不純物を添加した場合にキャリア濃度が大きく抵抗率の小さいp層が得られ、素子のV_f、しきい値が低下し易い傾向にある。このような膜厚の2種類の層を1ペアとして複数回積層して多層膜層を形成する。そして、p側多層膜クラッド層8の総膜厚の調整は、この第3及び第4の窒化物半導体膜の各膜厚を調整し積層回数を調整することにより行う。p側多層膜クラッド層8の総膜厚は、特に限定されないが、2000オングスト



ローム以下、好ましくは1000オングストローム以下、より好ましくは500オングストローム以下であり、総膜厚がこの範囲であると発光出力が高く、 V_f が低下し好ましい。

第3の窒化物半導体膜は少なくともAlを含む窒化物半導体、好ましくはAl_{1-n}Ga_nN ($0 < n \leq 1$) を成長させることが望ましく、第4の窒化物半導体は好ましくはAl_{1-p}Ga_pN ($0 \leq p < 1$ 、 $n > p$)、In_rGa_{1-r}N ($0 \leq r \leq 1$) のような2元混晶、3元混晶の窒化物半導体を成長させることが望ましい。
p側クラッド層8を超格子構造とすると、結晶性が良くなり、抵抗率が低下し V_f が低下する傾向がある。

p側多層膜クラッド層8の第3の窒化物半導体膜と第4の窒化物半導体膜とのp型不純物濃度は異なり、一方の層の不純物濃度を大きく、もう一方の層の不純物濃度を小さくする。n側クラッド層12と同様に、バンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体膜の方のp型不純物濃度を大きくして、バンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体膜のp型不純物濃度を小さく、好ましくはアンドープとすると、閾値電圧、 V_f 等を低下させることができる。またその逆でも良い。つまりバンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体膜のp型不純物濃度を小さくして、バンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体膜のp型不純物濃度を大きくしても良い。

第3の窒化物半導体膜への好ましいドーピング量としては $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 、さらに好ましくは $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ の範囲に調整する。
 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ よりも少ないと、同様に第4の窒化物半導体膜との差が少なくなつて、同様にキャリア濃度の大きい層が得られにくい傾向にあり、また $1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ よりも多いと、結晶性が悪くなる傾向にある。一方、第4の窒化物半導体膜のp型不純物濃度は第3の窒化物半導体膜よりも少なければ良く、好ましくは1/10以上少ない方が望ましい。最も好ましくはアンドープとすると最も移動度の高い層が得られるが、膜厚が薄いため、第3の窒化物半導体側から拡散してくるp型不純物があり、その量は $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 以下が望ましい。また、バンドギャップエネルギーが大きい第3の窒化物半導体膜にp型不純物を少なくドーピングして、バンドギャップエネルギーが小さい第4の窒化物半導体膜にp型不

純物を多くドーピングする場合も同様である。

p 型不純物としては Mg、Zn、Ca、Be 等の周期律表第 IIA 族、IIB 族元素を選択し、好ましくは Mg、Ca 等を p 型不純物とする。

さらにまた多層膜を構成する窒化物半導体層において、不純物が高濃度にドーピングされる層は、厚さ方向に対し、半導体層中心部近傍の不純物濃度が大きく、両端部近傍の不純物濃度が小さい（好ましくはアンドープ）とすることが、抵抗率を低下させるのに望ましい。

次に、p 側クラッド層 8 が、p 型不純物を含み $\text{Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなる単一層からなる場合、p 側単一膜クラッド層 8 の膜厚は、2000 オングストローム以下、好ましくは 1000 オングストローム以下であり、より好ましくは 500 ~ 100 オングストローム以下である。膜厚が上記範囲であると、発光出力が向上し、Vf が低下し好ましい。p 側単一膜クラッド層 8 の組成は、 $\text{Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 \leq b \leq 1$) である。

また、単一膜層のクラッド層は、前記多層膜構造の p 側クラッド層に比べ、結晶性はやや劣るものの、前記第 1 の多層膜層 4 との組み合わせにより、結晶性良く成長させることができ、しきい値や Vf の低下が可能となる。更に、このように単一膜としてもその他の層構成と組み合わせることにより素子の性能の低下を少なくし、しかも単一膜であるので、製造工程の簡易化が可能となり、量産する場合に好ましい。

p 側単一膜クラッド層 8 の p 型不純物の濃度は $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 、好ましくは $5 \times 10^{18} \sim 5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 、より好ましくは $5 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ である。不純物濃度が上記範囲であると、良好な p 型膜ができ好ましい。

次に、本実施の形態 5 において、Mg ドープ p 側 GaN コンタクト層 9 は、その組成を In、Al を含まない二元混晶の窒化物半導体とする。仮に In、Al を含有していると、p 電極 11 とオーミック接触が得られなくなり、発光効率が低下する。p 側コンタクト層 9 の膜厚は 0.001 ~ 0.5 μm 、好ましくは 0.01 ~ 0.3 μm 、より好ましくは 0.05 ~ 0.2 μm である。膜厚が 0.001 μm よりも薄いと p 型 GaAlN クラッド層と電氣的に短絡しやすくなり、コンタクト層として作用しにくい。また、三元混晶の GaAlN クラッド

層の上に、組成の異なる二元混晶のGaNコンタクト層を積層するため、逆にその膜厚を $0.5\mu\text{m}$ よりも厚くすると、結晶間のミスフィットによる格子欠陥がp側GaNコンタクト層9中に発生しやすく、結晶性が低下する傾向にある。なお、コンタクト層の膜厚は薄いほどVfを低下させ発光効率を向上させることができる。また、このp型GaNコンタクト層9のp型不純物はMgであるとp型特性が得られ易く、またオーミック接触が得られ易くなる。Mgの濃度は、 $1\times 10^{18}\sim 1\times 10^{21}/\text{cm}^3$ 、好ましくは $5\times 10^{19}\sim 3\times 10^{20}/\text{cm}^3$ 、より好ましくは $1\times 10^{20}/\text{cm}^3$ 程度である。Mg濃度がこの範囲であると良好なp型膜が得られ易く、Vfが低下し好ましい。

- 10 また、n電極12はn側コンタクト層4上に、p電極はMgドープp側GaNコンタクト層9上にそれぞれ形成されている。n電極及びp電極の材料としては特に限定されず、例えばn電極としてはW/AI、p電極としてはNi/Auなどを用いることができる。

実施の形態6.

- 15 次に、本発明に係る実施の形態6の窒化物半導体素子について説明する。

この実施の形態6の窒化物半導体素子は、n型多層膜層及びp型多層膜層を有する窒化物半導体であって、基本構成は実施の形態1と同様であるので、適宜、図1を参照しながら説明する。

- 20 実施の形態6の窒化物半導体素子は、サファイア基板1の上に、GaNよりなるバッファ層2、アンドープGaN層3、SiドープGaNよりなるn型コンタクト層4、アンドープGaN層5、n型多層膜層6、InGaN/GaNよりなる多重量子井戸構造の活性層7、p型多層膜層8、MgドープGaNよりなるp型コンタクト層9が順に積層されて構成され、上記n型多層膜層6及びp型多層膜層8を構成するそれぞれの窒化物半導体の組成、及び又は層数がn側とp側とで異なる点が、実施の形態1とは異なる。また、本実施の形態6の窒化物半導体素子では、n型多層膜層6及びp型多層膜層8として、実施の形態1～5で説明した種々の多層膜層を用いることができる。

25

ここで、図1には、n型窒化物半導体としてn型多層膜層を1層及びp型窒化物半導体としてp型多層膜層を1層設けているが、n側領域及びp側領域にそれ

5 ぞれ多層膜層を2層以上設けてもよい。例えば、上記アンドープGa_{1-x}N層5を、基板側からアンドープの窒化物半導体からなる下層、n型不純物がドーパされている窒化物半導体からなる中間層、及びアンドープの窒化物半導体からなる下層を順に積層してなる多層膜層とすると、発光出力、V_f及び静電耐圧をより良好とすることが好ましい。このようにn側領域に2種のn型多層膜層を有する場合、2種のn型多層膜層のいずれかが、p型多層膜層の層数より多ければよい。

まず、多層膜層について説明する。

本実施の形態6において、n型多層膜層6は、組成の異なる少なくとも2種類以上の窒化物半導体から構成されていればよく、好ましい組成としては、Al_zGa_{1-z}N (0 ≤ z < 1) [第1の窒化物半導体膜] と In_pGa_{1-p}N (0 < p < 1) [第2の窒化物半導体膜] との2種類の組成が挙げられる。

第1の窒化物半導体膜の好ましい組成としては、上記第1の窒化物半導体膜を示す化学式のz値が小さいほど結晶性が良くなり、より好ましくはz値が0 [ゼロ] を示すGa_{1-x}Nである。

15 また、第2の窒化物半導体膜の好ましい組成としては、上記第2の窒化物半導体膜を示す化学式のp値が0.5以下のIn_pGa_{1-p}N、より好ましくはp値が0.1以下のIn_pGa_{1-p}Nである。

本発明において、第1の窒化物半導体膜と第2の窒化物半導体膜との好ましい組み合わせとしては、第1の窒化物半導体膜がGa_{1-x}Nであり、第2の窒化物半導体膜がx値0.5以下のIn_xGa_{1-x}Nである組み合わせが挙げられる。

20 また、上記のような組成からなるn型多層膜層6は、第1の窒化物半導体膜及び第2の窒化物半導体膜をそれぞれ少なくとも1層以上形成し、合計で2層以上又は3層以上、好ましくはそれぞれ少なくとも2層以上積層し、合計で4層以上積層し、好ましくはそれぞれ少なくとも7層以上積層し、合計で14層以上積層する。

第1の窒化物半導体膜と第2の窒化物半導体膜の積層数の上限は特に限定されないが、例えば500層以下である。500層を超えると、積層する時間がかかり過ぎ操作が煩雑となったり、素子特性がやや低下する傾向がある。

n型多層膜6を構成する単一の窒化物半導体層の膜厚は、特に限定されないが、

2種類以上の窒化物半導体層の少なくとも1種類の単一の窒化物半導体層の膜厚を、100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、より好ましくは50オングストローム以下とする。

5 このようにn型多層膜層6を構成する単一の窒化物半導体層の膜厚を薄くすることにより、多層膜層が超格子構造となって、多層膜層の結晶性が良くなるので、出力が向上する傾向にある。

n型多層膜層6が第1の窒化物半導体膜と第2の窒化物半導体膜とから構成される場合、少なくとも一方の膜厚を、100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下とする。

10 第1の窒化物半導体膜及び第2の窒化物半導体膜の少なくとも一方が、100オングストローム以下の薄膜層とすると、単一の窒化物半導体層がそれぞれ弾性臨界膜厚以下となり結晶が良好となる。この結晶性が改善された窒化物半導体層上に更に弾性臨界膜厚以下の窒化物半導体を成長させると、より結晶性が良好となる。このことから第1及び第2の窒化物半導体膜の結晶性が積層されるに従って良くなり、結果としてn型多層膜層6全体の結晶性が良くなる。このようにn
15 型多層膜層6の全体の結晶性が良好となることにより、素子の発光出力が向上する。

20 第1の窒化物半導体膜及び第2の窒化物半導体膜の好ましい膜厚としては、両方とも100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下である。

n型多層膜層6を構成する第1及び第2の窒化物半導体膜の膜厚が両方とも100オングストローム以下とすると、単一の窒化物半導体層の膜厚が弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長できる。

25 また、n型多層膜層6の第1及び第2の窒化物半導体膜の両方の膜厚を70オングストローム以下にすると、多層膜層が超格子構造となり結晶性が良好となり、この結晶性の良い超格子構造の上に活性層を成長させると、n型多層膜層6がバッファ層のような作用をして、活性層を結晶性よく成長できる。

n型多層膜層6の総膜厚としては、特に限定されないが、25～10000オ

ングストロームであり、好ましくは25～5000オングストロームであり、より好ましくは25～1000オングストロームである。膜厚がこの範囲であると、結晶性が良く、素子の出力が向上する。

5 n型多層膜層6は、形成される位置は特に限定されず、活性層7に接して形成されても、活性層7と離れて形成されてもよく、好ましくはn型多層膜層6が活性層7に接して形成されていることが好ましい。

n型多層膜層6が活性層7に接して形成されている場合、活性層7の最初の層である井戸層又は障壁層と接するn型多層膜層6を構成する窒化物半導体層としては、第1の窒化物半導体膜でも、第2の窒化物半導体膜でも良い。このように
10 n型多層膜層6を構成する第1の窒化物半導体膜と第2の窒化物半導体膜との積層順序は、特に限定されない。つまり、第1の窒化物半導体から積層を始め、第1の窒化物半導体で終わっても、第1の窒化物半導体から積層を始め、第2の窒化物半導体で終わっても、第2の窒化物半導体から積層を始め、第1の窒化物半導体で終わっても、また、第2の窒化物半導体から積層を始め、第2の窒化物半導体で終わってもよい。
15

図1では、n型多層膜層6は、活性層7に接して形成されているが、上記したように、n型多層膜層6が活性層7と離れて形成されている場合、n型多層膜層6と活性層7との間に、他のn型窒化物半導体よりなる層が形成されていてもよい。

20 本実施の形態6において、n型多層膜層6を構成する単一の窒化物半導体層、例えば第1及び第2の窒化物半導体膜は、アンドープでも、n型不純物がドーブされていてもよい。

本実施の形態6において、アンドープとは、意図的に不純物をドーブしない状態を指し、例えば隣接する窒化物半導体層から拡散により混入される不純物も本
25 発明ではアンドープという。なお、拡散により混入される不純物は層内において不純物濃度に勾配がついていることが多い。

n型多層膜層6を構成する単一の窒化物半導体層が、第1の窒化物半導体膜及び第2の窒化物半導体膜からなる場合、第1および第2の窒化物半導体膜は両方ともアンドープでも良いし、両方にn型不純物がドーブされていても良いし、ま

たいずれか一方に不純物がドーピングされていてもよい。

第1の窒化物半導体膜及び第2の窒化物半導体膜のいずれか一方にn型不純物をドーピングすること、又は、両方にn型不純物がドーピングされ隣接する窒化物半導体層同士で濃度が異なることを、変調ドーピングと呼び、変調ドーピングすることにより、
5 出力が向上しやすい傾向にある。

また、第1の窒化物半導体膜および第2の窒化物半導体膜の両方にn型不純物がドーピングされている場合は、隣接する単一の窒化物半導体層同士で不純物濃度が異なっても同一でもよく、好ましくは異なることが挙げられる。

結晶性を良くするためには、アンドーピングが最も好ましく、次に隣接する一方が
10 アンドーピングの変調ドーピング、その次に隣接する両方にドーピングする変調ドーピングの順である。

また、第1の窒化物半導体膜及び第2の窒化物半導体膜の両方にn型不純物がドーピングされている場合、不純物濃度は、いずれの層の濃度が高くてもよい。

n型不純物をドーピングする場合の不純物濃度は、特に限定されないが、
15 $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 以下、好ましくは $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以下、下限としては $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ に調整する。 $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ よりも多いと窒化物半導体層の結晶性が悪くなって、逆に出力が低下する傾向にある。これは変調ドーピングの場合も同様である。

本発明において、n型不純物としては、Si、Ge、Sn、S等のIV族、VI族元素を好ましく選択し、さらに好ましくはSi、Snを用いる。

20 次に、p型多層膜層8について説明する。

本実施の形態6において、p型多層膜層8は、組成の異なる少なくとも2種類以上の窒化物半導体から構成されていればよく、好ましい組成としては、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 1$) [第3の窒化物半導体膜] と $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($0 \leq y < 1$) [第4の窒化物半導体膜] との2種類の組成が挙げられる。

25 第3の窒化物半導体膜の好ましい組成としては、上記第3の窒化物半導体膜を示す化学式のx値が0.5以下の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ である。xが0.5を超えると結晶性が悪くなってクラックが入りやすい傾向にある。

また、第4の窒化物半導体膜の好ましい組成としては、上記第4の窒化物半導体膜を示す化学式のy値が0 [ゼロ] の Ga_1N である。y値がゼロであると全体

的に結晶性の良い多層膜層が成長でき易くなる傾向がある。

本実施の形態6において、n型多層膜層8を構成する窒化物半導体の好ましい組み合わせとしては、第3の窒化物半導体膜がx値0.5以下の $Al_xGa_{1-x}N$ であり、第4の窒化物半導体膜がGaNとの組み合わせが挙げられる。

- 5 また、上記のような組成からなるp型多層膜層8は、第3の窒化物半導体膜及び第4の窒化物半導体膜をそれぞれ少なくとも1層以上形成し、合計で2層以上又は3層以上、好ましくはそれぞれ少なくとも2層以上積層し、合計で4層以上積層する。

- 10 第3の窒化物半導体膜と第4の窒化物半導体膜の積層の上限は特に限定されないが、積層時間等の製造工程や素子特性などを考慮すると、例えば100層以下が挙げられる。

- 15 p型多層膜層8の総膜厚としては、特に限定されないが、25～10000オングストロームであり、好ましくは25～5000オングストロームであり、より好ましくは25～1000オングストロームである。膜厚がこの範囲であると、結晶性が良く、素子の出力が向上する。

また本発明において、p型多層膜層8は、上記範囲の膜厚内で比較的膜厚を薄く形成される方が、素子のV_f、閾値が低下しやすくなる傾向にある。

- 20 p型多層膜層8を構成する単一の窒化物半導体層の膜厚は、特に限定されないが、2種類以上の窒化物半導体層の少なくとも1種類の窒化物半導体層の単一の窒化物半導体層の膜厚を、100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、より好ましくは50オングストローム以下とする。

- 25 このようにp型多層膜層8を構成する単一の窒化物半導体層の膜厚を薄くすることにより、多層膜層が超格子構造となって、多層膜層の結晶性が良くなるので、p型不純物を添加した場合にキャリア濃度が大きく抵抗率の小さいp層が得られ、素子のV_fやしきい値等が低下し易い傾向がある。これによって、低消費電力で良好な発光出力を得ることができる。

p型多層膜層8が第3の窒化物半導体膜と第4の窒化物半導体膜とから構成される場合、少なくとも一方の膜厚を、100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下とする。

第3の窒化物半導体膜及び第4の窒化物半導体膜の少なくとも一方が、100オングストローム以下の薄膜層とすると、単一の窒化物半導体層がそれぞれ弾性臨界膜厚以下となり結晶が良好となる。この結晶性が改善された窒化物半導体層上に更に弾性臨界膜厚以下の窒化物半導体を成長させると、より結晶性が良好となる。

5 このことから第3及び第4の窒化物半導体膜の結晶性が積層されるに従って良くなり、結果として、p型多層膜層8全体の結晶性が良くなる。このようにp型多層膜層8の全体の結晶性が良好となることにより、p型不純物を添加した場合にキャリア濃度が大きく抵抗率の小さいp型層が得られ、素子のV_fやしきい値等が低下し易い傾向にある。これによって、低消費電力で良好な発光出力を得

10 ることができる。

第3の窒化物半導体膜及び第4の窒化物半導体膜の好ましい膜厚は、両方とも100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下である。

p型多層膜層8を構成する第3及び第4の窒化物半導体膜の膜厚が両方とも100オングストローム以下とすると、単一の窒化物半導体層の膜厚が弾性臨界膜厚以下となり、厚膜で成長させる場合に比較して結晶性の良い窒化物半導体が成長できる。

15

また、p型多層膜層8の第3及び第4の窒化物半導体膜の両方の膜厚を70オングストローム以下にすると、多層膜層が超格子構造となり結晶性が良好となり、素子のV_fやしきい値等が低下し易くなり、発光出力を向上させるのに好ましい。

20

p型多層膜層8は、形成される位置は特に限定されず、活性層7に接して形成されても、活性層7と離れて形成されてもよく、好ましくはp型多層膜層8が活性層7に接して形成されていることが好ましい。p型多層膜層8が活性層7に接して形成されていると発光出力が向上し易くなり好ましい。

p型多層膜層8が活性層7に接して形成されている場合、活性層7の最初の層である井戸層又は障壁層と接するp型多層膜層8を構成する窒化物半導体層としては、第3の窒化物半導体膜でも、第4の窒化物半導体膜でも良い。このようにp型多層膜層8を構成する第3の窒化物半導体膜と第4の窒化物半導体膜との積層順序は、特に限定されない。つまり、第3の窒化物半導体膜から積層を始め、

25

第3の窒化物半導体膜で終わっても、第3の窒化物半導体膜から積層を始め、第4の窒化物半導体膜で終わっても、第4の窒化物半導体膜から積層を始め、第3の窒化物半導体膜で終わっても、また、第4の窒化物半導体膜から積層を始め、第4の窒化物半導体膜で終わってもよい。

5 図1では、p型多層膜層8は、活性層7に接して形成されているが、上記したように、p型多層膜層8が活性層7と離れて形成されている場合、p型多層膜層8と活性層7との間に、他のp型窒化物半導体よりなる層が形成されていてもよい。

また、本実施の形態6において、第3の窒化物半導体膜及び第4の窒化物半導体膜は、両方ともアンドープでも、いずれか一方にp型不純物がドーピングされていてもよく、両方にp型不純物がドーピングされていてもよい。

p型多層膜層8を構成する第3及び第4の窒化物半導体膜が、両方ともにアンドープである場合、p型多層膜層8の膜厚を0.1 μm 以下、好ましくは700オングストローム以下、さらに好ましくは500オングストローム以下にする。

15 膜厚が0.1 μm よりも厚いと、活性層に正孔が注入されにくくなって、発光出力が低下しやすい傾向にある。また、膜厚が、0.1 μm を超えると、アンドープ層の抵抗値が高くなる傾向にあるからである。

また、第3及び第4の窒化物半導体膜のいずれか一方に、p型不純物がドーピングされる変調ドーピングをすると、発光出力が向上しやすい傾向にある。また、変調ドーピングするとキャリア濃度の高いp層が得られ易くなり好ましい。

また、第3及び第4の窒化物半導体膜の両方にp型不純物をドーピングすると一方がアンドープの場合に比べて、更にキャリア濃度が高くなるのでV_fが低下し好ましい。第3及び第4の窒化物半導体膜の両方にp型不純物をドーピングする場合、隣接する窒化物半導体層同士の不純物濃度が同一でもよいが、異なること（変調ドーピング）が好ましい。

本実施の形態6において、p型多層膜層8にp型不純物をドーピングする場合、p型不純物としては、Mg、Zn、Cd、Be、Ca等のII族元素を好ましく選択し、好ましくは、Mg、Beを用いる。

p型不純物をドーピングする場合、不純物濃度は $1 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 以下、好ましく

は $5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 以下に調整する。 $1 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ よりも多いと窒化物半導体層の結晶性が悪くなって、発光出力が低下する傾向にある。 p 型不純物のドーパ量の下限は特に限定されないが、 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以上である。

以下に、図 1 に示される n 型多層膜層 6 及び p 型多層膜層 8 以外の他の素子構造を形成する各層について説明するが、本発明はこれに限定されない。

基板 1 としては、C 面、R 面又は A 面を主面とするサファイア、その他、スピネル (MgAl_2O_4) のような絶縁性の基板の他、SiC (6H、4H、3C を含む)、Si、ZnO、GaAs、GaN 等の半導体基板を用いることができる。

バッファ層 2 としては、 $\text{Ga}_{1-d}\text{Al}_d\text{N}$ (但し d は $0 < d \leq 1$ の範囲である。) からなる窒化物半導体であり、好ましくは Al の割合が小さい組成ほど結晶性の改善が顕著となり、より好ましくは GaN からなるバッファ層 2 が挙げられる。

バッファ層 2 の膜厚は、 $0.002 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、好ましくは $0.005 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 、更に好ましくは $0.01 \sim 0.02 \mu\text{m}$ の範囲に調整する。バッファ層 2 の膜厚が上記範囲であると、窒化物半導体の結晶モフォロジーが良好となり、バッファ層 2 上に成長させる窒化物半導体の結晶性が改善される。

バッファ層 2 の成長温度は、 $200 \sim 900^\circ\text{C}$ であり、好ましくは $400 \sim 800^\circ\text{C}$ の範囲に調整する。成長温度が上記範囲であると良好な多結晶となり、この多結晶が種結晶としてバッファ層 2 上に成長させる窒化物半導体の結晶性を良好にでき好ましい。また、このような低温で成長させるバッファ層 2 は、基板の種類、成長方法等によっては省略してもよい。

アンドープ GaN 層 3 としては、先に成長させたバッファ層 2 よりも高温、例えば $900^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$ で成長させ、 $\text{In}_f\text{Al}_g\text{Ga}_{1-f-g}\text{N}$ ($0 \leq f$ 、 $0 \leq g$ 、 $f + g \leq 1$) で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくは GaN、 g 値が 0.2 以下の $\text{Al}_g\text{Ga}_{1-g}\text{N}$ とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。また膜厚は特に問うものではなく、バッファ層よりも厚膜で成長させ、通常 $0.1 \mu\text{m}$ 以上の膜厚で成長させる。

Si ドープ GaN からなる n 型コンタクト層 4 としては、アンドープ GaN 層 3 と同様に、 $\text{In}_f\text{Al}_g\text{Ga}_{1-f-g}\text{N}$ ($0 \leq f$ 、 $0 \leq g$ 、 $f + g \leq 1$) で構成でき、

その組成は特に問うものではないが、好ましくはGaN、g値が0.2以下のAl_gGa_{1-g}Nとすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。膜厚は特に問うものではないが、n電極を形成する層であるので1μm以上の膜厚で成長させることが望ましい。さらにn型不純物濃度は窒化物半導体の結晶性を悪くしない程度に高濃度にドーピングすることが望ましく、 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以上、 $5 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 以下の範囲でドーピングすることが望ましい。

アンドープGaN層5としては、上記と同様に、In_fAl_gGa_{1-f-g}N ($0 \leq f, 0 \leq g, f + g \leq 1$)で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくはGaN、g値が0.2以下のAl_gGa_{1-g}N、またはf値が0.1以下のIn_fGa_{1-f}Nとすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。このアンドープGaN層を成長させることにより、高濃度で不純物をドーピングしたn型コンタクト層4の上に直接次層を成長させるのとは異なり、下地の結晶性が良くなるため、次に成長させるn型多層膜層6が成長し易くなり、更にn型多層膜層上に活性層7を成長させると成長しやすく結晶性が良好となり好ましい。このように、アンドープの窒化物半導体層よりなるアンドープGaN層3の上に、高濃度でn型不純物をドーピングした窒化物半導体よりなるn型コンタクト層4、次にアンドープの窒化物半導体よりなるアンドープGaN層5を積層し、更に前記n型多層膜層6を積層した構造とすると、LED素子にした場合にV_fが低下しやすい傾向にある。なおn型多層膜層6をアンドープにする場合はアンドープGaN層5を省略することができる。

また、本実施の形態6において、上記アンドープGaN層5に変えて、実施の形態5と同様、アンドープの下層305a、n型不純物ドーピングの中間層305b、アンドープの上層305cからなる多層膜層としてもよい。

多層膜層は、基板側から、アンドープの下層305a、n型不純物ドーピングの中間層305b、アンドープの上層305cの少なくとも3層から構成されている。多層膜層には上記下層305a～上層305c以外のその他の層を有していてもよい。また多層膜層は、活性層と接していても、活性層の間に他の層を有していてもよい。

上記下層305a～上層305cを構成する窒化物半導体としては、In_fAl_g

$I_hGa_{1-g}N$ ($0 \leq g < 1$, $0 \leq h < 1$) で表される種々の組成の窒化物半導体を用いることができ、好ましくはGaNからなる組成のものが挙げられる。また多層膜層の各層は組成が同一でも異なってもよい。

5 多層膜層の膜厚は、特に限定されないが、175～12000オングストロームであり、好ましくは1000～10000オングストロームであり、より好ましくは2000～6000オングストロームである。多層膜層の膜厚が上記範囲であるとVfの最適化と静電耐圧の向上の点で好ましい。

上記範囲の膜厚を有する多層膜層の膜厚の調整は、下層305a、中間層305b、及び上層305cの各膜厚を適宜調整して、多層膜層の総膜厚を上記の範囲とすることが好ましい。

10 多層膜層を構成する下層305a、中間層305b及び上層305cの各膜厚は、特に限定されないが、多層膜層中で積層される位置により素子性能の諸特性に与える影響が異なるため、各層の素子性能に大きく関与する特性に特に注目し、いずれか2層の膜厚を固定し、残りの1層の膜厚を段階的に変化させて、特性の良好な範囲の膜厚を測定し、更に各層との調整により膜厚の範囲を特定している。

多層膜層の各層は、各々静電耐圧に直接影響を及ぼさない場合もあるが、各層を組み合わせて多層膜層とすることにより、全体として種々の素子特性が良好であると共に、特に発光出力及び静電耐圧が著しく良好となる。

20 アンドープの下層305aの膜厚は、100～10000オングストローム、好ましくは500～8000オングストローム、より好ましくは1000～5000オングストロームである。アンドープの下層305aは、膜厚を徐々に厚くしていくと静電耐圧が上昇していくが、10000オングストローム付近でVfが急上昇し、一方膜厚を薄くしていくと、Vfは低下していくが、静電耐圧の低下が大きくなり、100オングストローム未満では静電耐圧の低下に伴い歩留まりの低下が大きくなる傾向が見られる。また、上層305aは、n型不純物を含むn側コンタクト層4の結晶性の低下の影響を改善していると考えられるので、結晶性の改善が良好となる程度の膜厚で成長されるのが好ましい。

25 n型不純物ドーパの中間層305bの膜厚は、50～1000オングストローム、好ましくは100～500オングストローム、より好ましくは150～400

0 オングストロームである。この不純物がドーブされた中間層 305 b は、キャリア濃度を十分とさせて発光出力に比較的大きく作用する層であり、この層を形成させないと著しく発光出力が低下する傾向がある。膜厚が 1000 オングストロームを超えると発光出力が商品となりにくい程度まで大きく低下する傾向がある。一方、中間層 305 b の膜厚が厚いと静電耐圧は良好であるが、膜厚が 50

5 0 オングストローム未満では静電耐圧の低下が大きくなる傾向がある。

アンドープの上層 305 c の膜厚は、25 ~ 1000 オングストローム、好ましくは 25 ~ 500 オングストローム、より好ましくは 25 ~ 150 オングストロームである。このアンドープの上層 305 c は、第 1 多層膜の中で活性層に接してあるいは最も接近して形成され、リーク電流の防止に大きく関与しているが、

10 上層 305 c の膜厚が 25 オングストローム未満ではリーク電流が増加する傾向がある。また、上層 305 c の膜厚が 1000 オングストロームを超えると V_f が上昇し静電耐圧も低下する傾向がある。

以上のように、下層 305 a ~ 上層 305 c の各膜厚は、各層の膜厚の変動に、より多くの影響をうける素子特性に注目し、更に、下層 305 a、中間層 305

15 b 及び上層 305 c を組み合わせた際に、諸素子特性すべてが良好となり、特に発光出力及び静電耐圧が良好となるように、各膜厚を規定することにより、良好な発光出力及び良好な静電耐圧を得ることができ、商品の信頼性の更なる向上を達成することができる。

また、多層膜層の各層の膜厚の組み合わせは、発光波長の種類による活性層の組成の変化や、電極、LED 素子の形状など種々の条件により、最も良好な効果を得るために適宜調整される。各層の膜厚の組み合わせに伴う性能は、上記範囲の膜厚で適宜組み合わせることにより、従来のものに比べ良好な発光出力及び良好な静電耐圧を得ることができる。

20

多層膜層を構成する各層 305 a、305 b、305 c の組成は、 $\text{In}_m\text{Al}_n\text{Ga}_{1-m-n}\text{N}$ ($0 \leq m < 1$, $0 \leq n < 1$) で表される組成であればよく、各層の組成が同一でも異なってもよく、好ましくは In 及び Al の割合が小さい組成であり、より好ましくは GaN からなる層が好ましい。

25

上記 n 型不純物ドーブの中間層 5 b の n 型不純物のドーブ量は、特に限定され

ないが、 $3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上、好ましくは $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上の濃度で含有する。n 型不純物の上限としては、特に限定されないが、結晶性が悪くなりすぎない程度の限界としては $5 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 以下が望ましい。第 1 の多層膜層の中間層の不純物濃度が上記範囲であると、発光出力の向上と V_f の低下の点で好ましい。

n 型不純物としては Si、Ge、Se、S、O 等の周期律表第 IVB 族、第 VI B 族元素を選択し、好ましくは Si、Ge、S を n 型不純物とする。

また、多層膜層の界面においては、それぞれの層及び素子の機能を害しない範囲で両方の層を兼ねる。

次に、活性層 7 としては、少なくとも In を含んでなる窒化物半導体、好ましくは $\text{In}_j\text{Ga}_{1-j}\text{N}$ ($0 \leq j < 1$) を含んでなる井戸層を有する単一量子井戸構造、又は多重量子井戸構造のものが挙げられる。

活性層 7 の積層順は、井戸層から積層して井戸層で終わってもよく、井戸層から積層して障壁層で終わってもよく、また、障壁層から積層して井戸層で終わっても良く積層順は特に問わない。井戸層の膜厚としては 100 オングストローム以下、好ましくは 70 オングストローム以下、さらに好ましくは 50 オングストローム以下に調整する。100 オングストロームよりも厚いと、出力が向上しにくい傾向にある。一方、障壁層の厚さは 300 オングストローム以下、好ましくは 250 オングストローム以下、最も好ましくは 200 オングストローム以下に調整する。

次に、Mg ドープ GaN からなる p 型コンタクト層 9 としては、上記と同様に $\text{In}_f\text{Al}_g\text{Ga}_{1-f-g}\text{N}$ ($0 \leq f$ 、 $0 \leq g$ 、 $f + g \leq 1$) で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくは GaN とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすく、また p 電極材料と好ましいオーミック接触が得られやすい。

また、本発明において用いられる p 電極及び n 電極は、特に限定されず、従来知られている電極等を用いることができ、例えば実施例に記載の電極が挙げられる。

実施例.

以下、本発明に係る実施例について説明するが、本発明は以下の実施例に限定されるものではない。

実施例 1.

5 実施例 1 は、図 1 に示した、本発明に係る実施の形態 1 に関連した実施例である。

本実施例 1 では、サファイア（C 面）よりなる基板 1 を MOVPE の反応容器内にセットし、水素を流しながら、基板の温度を 1050℃ まで上昇させ、基板のクリーニングを行った後、以下の各層を形成する。尚、基板 1 にはサファイア C 面の他、R 面、A 面を主面とするサファイア、その他、スピネル（MgAl₂O₄）のような絶縁性の基板の他、SiC（6H、4H、3C を含む）、Si、ZnO、GaAs、GaN 等の半導体基板を用いることができる。

（第 1 のバッファ層 2）

15 続いて、温度を 510℃ まで下げ、キャリアガスに水素、原料ガスにアンモニアと TMG（トリメチルガリウム）とを用い、基板 1 上に GaN よりなるバッファ層 202 を約 200 オングストロームの膜厚で成長させる。なおこの低温で成長させる第 1 のバッファ層 2 は基板の種類、成長方法等によっては省略できる。

（第 2 のバッファ層 3）

20 バッファ層 2 成長後、TMG のみ止めて、温度を 1050℃ まで上昇させる。1050℃ になったら、同じく原料ガスに TMG、アンモニアガスを用い、アンドープ GaN よりなる第 2 のバッファ層 3 を 1 μm の膜厚で成長させる。第 2 のバッファ層は先に成長させた第 1 のバッファ層 2 よりも高温、例えば 900℃ ~ 1100℃ で成長させ、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ （ $0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$ ）で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくは GaN、 x 値が 0.2 以下の $Al_xGa_{1-x}N$ とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。

25 また膜厚は特に問うものではなく、バッファ層よりも厚膜で成長させ、通常 0.1 μm 以上の膜厚で成長させる。

（n 側コンタクト層 4）

続いて 1050℃ で、同じく原料ガスに TMG、アンモニアガス、不純物ガスにシランガスを用い、Si を $3 \times 10^{19}/cm^3$ ドープした GaN よりなる n 側コ

ンタクト層を $3 \mu\text{m}$ の膜厚で成長させる。この n 側コンタクト層 4 も第 2 のバッファ層 3 と同様に、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$) で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくは GaN 、 x 値が 0.2 以下の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。膜厚は特に問うものではないが、 n 電極を形成する層であるので $1 \mu\text{m}$ 以上の膜厚で成長させることが望ましい。さらに n 型不純物濃度は窒化物半導体の結晶性を悪くしない程度に高濃度にドーピングすることが望ましく、 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以上、 $5 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 以下の範囲でドーピングすることが望ましい。

(第 3 のバッファ層 5)

次にシランガスのみを止め、 1050°C で同様にしてアンドーブ GaN よりなる第 3 のバッファ層 5 を 100 オングストロームの膜厚で成長させる。この第 3 のバッファ層 5 も $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$) で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくは GaN 、 x 値が 0.2 以下の $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 、または y 値が 0.1 以下の $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。このアンドーブ GaN 層を成長させることにより、高濃度で不純物をドーピングした n 側コンタクト層 4 の上に直接活性層を成長させるのと異なり、下地の結晶性が良くなるため、次に成長させる窒化物半導体を成長しやすくする。このように、アンドーブの窒化物半導体層よりなる第 2 のバッファ層 3 の上に、高濃度で n 型不純物をドーピングした窒化物半導体よりなる n 側コンタクト層 4、次にアンドーブの窒化物半導体 (n 側多層膜層も含む。) よりなる第 3 のバッファ層 5 を積層した 3 層構造とすると、LED 素子にした場合に V_f が低下しやすい傾向にある。なお n 側多層膜層 6 をアンドーブにする場合は第 3 のバッファ層 5 を省略することができる。

(n 側多層膜層 6)

次に、温度を 800°C にして、TMG、TM1、アンモニアを用い、アンドーブ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させ、続いて温度を上昇させ、その上に GaN よりなる第 2 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第 1 + 第 2 の順で交互に 10 層ずつ積層した超格子構造よりなる n 側多層膜を 500 オング

ストロームの膜厚で成長させる。

(活性層 7)

次に、アンドープ GaN よりなる障壁層を 200 オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を 800℃ にして、TMG、TMI、アンモニアを用いアンドープ $In_{0.4}Ga_{0.6}N$ よりなる井戸層を 30 オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を 5 層、井戸層 4 層交互に積層して、総膜厚 1.120 オングストロームの多重量子井戸構造よりなる活性層 7 を成長させる。活性層 7 は障壁層から積層したが、積層順は井戸層から積層して、井戸層で終わってもよく、また井戸層から積層して障壁層で終わる場合、障壁層から積層して井戸層で終わっても良く積層順は特に問わない。井戸層の膜厚としては 100 オングストローム以下、好ましくは 70 オングストローム以下、さらに好ましくは 50 オングストローム以下に調整する。100 オングストロームよりも厚いと、出力が向上しにくい傾向にある。一方、障壁層の厚さは 300 オングストローム以下、好ましくは 250 オングストローム以下、最も好ましくは 200 オングストローム以下に調整する。

(p 側多層膜層 8)

次に、TMG、TMA、アンモニア、 Cp_2Mg (シクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、 Mg を $5 \times 10^{19}/cm^3$ ドープした p 型 $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ よりなる第 3 の窒化物半導体膜を 25 オングストロームの膜厚で成長させ、続いて Cp_2Mg 、TMA を止めアンドープ GaN よりなる第 4 の窒化物半導体膜を 25 オングストロームの膜厚で成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第 3 + 第 4 の順で交互に 4 層ずつ積層した超格子よりなる p 側多層膜層 8 を 200 オングストロームの膜厚で成長させる。

(p 側コンタクト層 9)

続いて 1050℃ で、TMG、アンモニア、 Cp_2Mg を用い、 Mg を $1 \times 10^{20}/cm^3$ ドープした p 型 GaN よりなる p 側コンタクト層 208 を 700 オングストロームの膜厚で成長させる。p 側コンタクト層 208 も $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$) で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくは GaN とすると結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすく、

また p 電極材料と好ましいオーミック接触が得られやすい。

反応終了後、温度を室温まで下げ、さらに窒素雰囲気中、ウェーハを反応容器内において、700℃でアニーリングを行い、p 型層をさらに低抵抗化する。

5 アニーリング後、ウェーハを反応容器から取り出し、最上層の p 側コンタクト層 9 の表面に所定の形状のマスクを形成し、RIE（反応性イオンエッチング）装置で p 側コンタクト層側からエッチングを行い、図 1 に示すように n 側コンタクト層 4 の表面を露出させる。

エッチング後、最上層にある p 側コンタクト層のほぼ全面に膜厚 200 オングストロームの Ni と Au を含む透光性の p 電極 10 と、その p 電極 10 の上にボンディング用の Au よりなる p パッド電極 11 を 0.5 μm の膜厚で形成する。
10 一方、エッチングにより露出させた n 側コンタクト層 4 の表面には W と Al を含む n 電極 12 を形成して LED 素子とした。

この LED 素子は順方向電圧 20 mA において、520 nm の純緑色発光を示し、V_f は 3.2 V しかなく、従来の多重量子井戸構造の LED 素子に比較して、
15 V_f で 0.8 V 近く低下し、出力は 2 倍以上に向上した。そのため、10 mA で従来の LED 素子とほぼ同等の特性を有する LED が得られた。

本実施例において、n 側多層膜層を構成する第 2 の窒化物半導体膜は GaN で構成したが、他の $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$)、好ましくは In 組成が第 1 の窒化物半導体よりも小さい InGa_{0.9}N で構成することもできる。
20 また p 側多層膜層を構成する第 4 の窒化物半導体膜は GaN で構成したが、他の $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$)、好ましくは第 3 の窒化物半導体よりも Al 組成の小さい AlGa_{0.9}N で構成することもできる。

なお、従来の LED 素子の構成は、GaN よりなる第 1 のバッファ層の上に、アンドープ GaN よりなる第 2 のバッファ層、Si ドープ GaN よりなる n 側コンタクト層、実施例 1 と同一の多重量子井戸構造よりなる活性層、単一の Mg
25 ドープ Al_{0.1}Ga_{0.9}N 層、Mg ドープ GaN からなる p 側コンタクト層を順に積層したものである。

実施例 2.

実施例 2 は、図 2 に示す LED 素子である。この実施例の LED 素子は、実施

例1において、第3のバッファ層5を成長させず、さらにp側多層膜層8を超格子構造とせずに、Mgを $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層よりなるp側クラッド層108を200オングストロームの膜厚で成長させる他は、同様にしてLED素子を作製したところ、同じく20mAにおいて、Vfは3.3Vと非常に良好な値を示し、出力も1.8倍以上に向上した。

実施例3.

実施例1において、n側多層膜層6を成長する際に、第2の窒化物半導体膜のみを、Siを $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGa_{0.97}Nとする。また、p側多層膜層を超格子構造とせずに、Mgを $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層よりなるp側クラッド層108を200オングストロームで成長させる他は同様にして、LED素子を作製したところ、実施例2とほぼ同等の特性を有するLED素子が得られた。

実施例4.

実施例1において、n側多層膜層6を成長する際に、第1の窒化物半導体膜をSiを $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープした $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 層とし、第2の窒化物半導体膜を、Siを $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGa_{0.97}Nとする。また、p側多層膜層を超格子構造とせずに、Mgを $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層よりなるp側クラッド層108とする他は同様にして、LED素子を作製したところ、20mAにおいてVfは3.4V、出力は従来のものに比較して、1.5倍以上と優れた特性を示した。

実施例5.

実施例1において、第3のバッファ層5を成長させず、さらにp側多層膜層8を成長する際に、第4の窒化物半導体膜にMgを $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型Ga_{0.95}N層を成長させる他は同様にしてLED素子を作製したところ、実施例1とほぼ同等の特性を有するLED素子が得られた。

実施例6.

実施例1において、第3のバッファ層5を成長させず、さらにp側多層膜層8を成長する際に、アンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第3の窒化物半導体膜を25オングストロームと、アンドープGa_{0.95}Nよりなる第4の窒化物半導体膜を2

5 オングストロームとでそれぞれ2層ずつ交互に積層して総膜厚100オングストロームとする他は同様にしてLED素子を作製したところ、実施例4とほぼ同等の特性を有するLED素子が得られた。

実施例7.

5 実施例1において、n側多層膜層6を成長させる際、アンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ よりなる第1の窒化物半導体膜を50オングストローム成長させ、次にアンドープ GaN よりなる第2の窒化物半導体膜を25オングストローム成長させる。続いてアンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 層を45オングストローム成長させ、続いてアンドープ GaN 層を25オングストローム成長させ、次にアンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ 層を40オングストローム成長させる。このようにして第1の窒化物半導体膜のみを5オングストロームずつ薄くして、5オングストロームまで成長させ、第1の層と第2の層とを交互に10層ずつ積層した超格子構造よりなるn側多層膜を合計525オングストロームの膜厚で成長させる。

15 一方、同じく実施例1において、p側多層膜層8を成長させる際、 Mg を $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第3の窒化物半導体膜を40オングストロームの膜厚で成長させ、次にアンドープ GaN よりなる第4の窒化物半導体膜を25オングストロームの膜厚で成長させ、次に Mg を同量ドープしたp型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層を35オングストローム、次にアンドープ GaN を25オングストローム成長させる。このようにして第3の窒化物半導体膜のみを5オングストロームずつ薄くして、20オングストロームまで成長させ、第3の層と、第4の層とを交互に5層ずつ積層した超格子構造よりなるp側多層膜を合計275オングストロームの膜厚で成長させる。

25 その他は実施例1と同様にしてLED素子を得たところ、実施例1のものと同様の特性を有する素子が得られた。なお、本実施例において、n側多層膜6を構成する第1の窒化物半導体膜のみの膜厚を変えていったが、第2の窒化物半導体膜の膜厚を変えても同様の効果が得られる。またp側多層膜8を構成する第3の窒化物半導体膜のみの膜厚を変えていったが、第4の窒化物半導体膜の膜厚を変えても同様の効果が得られる。

実施例8.

実施例 1 において、n 側多層膜層 6 を成長させる際、アンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させ、次にアンドープ GaN よりなる第 2 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させる。続いて In のモル比を若干多くした InGaN 層を 25 オングストローム成長させ、続いてアンドープ GaN 層を 25 オングストローム成長させる。このようにして第 1 の窒化物半導体膜の In 組成を徐々に増加させて成長させ、第 1 の層と、第 2 の層とを交互に 10 層ずつ積層し、最終的に第 1 の層が $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ となるようにして、総膜厚 500 オングストロームの n 側多層膜を成長させる。

一方、同じく実施例 1 において、p 側多層膜層 8 を成長させる際、 Mg を $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープした p 型 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 3 の窒化物半導体膜を 25 オングストロームの膜厚で成長させ、次にアンドープ GaN よりなる第 4 の窒化物半導体膜を 25 オングストロームの膜厚で成長させ、続いて、 Mg を同量ドープして、 Al の組成比を若干多くした p 型 AlGaN 層を 25 オングストローム、次にアンドープ GaN を 25 オングストローム成長させる。このようにして第 3 の窒化物半導体膜の Al 組成を徐々に多くして成長させ、第 3 の層と、第 4 の層とを交互に 4 層ずつ積層し、最終的に第 3 の層が $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ となるようにして、総膜厚 200 オングストロームの p 側多層膜を成長させる。

その他は実施例 1 と同様にして LED 素子を得たところ、実施例 1 のものとほぼ同等の特性を有する素子が得られた。なお、本実施例において、n 側多層膜 6 を構成する第 1 の窒化物半導体膜のみの III 族元素組成を変えていったが、第 2 の窒化物半導体膜を 3 元混晶、4 元混晶の窒化物半導体として、その III 族元素の組成を変えても同様の効果が得られる。また p 側多層膜 8 を構成する第 3 の窒化物半導体膜のみの III 族元素の組成を変えていったが、第 4 の窒化物半導体膜を 3 元混晶、4 元混晶の窒化物半導体として、その III 族元素の組成を変えても同様の効果が得られる。

実施例 9.

実施例 7 において、p 側多層膜層 8 を多層膜層とせずに、 Mg を $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープした p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層よりなる p 側クラッド層 108 を 200 オングストロームの膜厚で成長させる他は、同様にして LED 素子を作製したとこ

る、実施例 2 とほぼ同等の特性を有する LED 素子が得られた。

実施例 10.

5 実施例 8 において、p 側多層膜層 8 を多層膜層とせずに、Mg を $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープした p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層よりなる p 側クラッド層 108 を 200 オングストロームの膜厚で成長させる他は、同様にして LED 素子を作製したところ、実施例 2 とほぼ同等の特性を有する LED 素子が得られた。

実施例 11.

10 実施例 8 において、n 側多層膜を構成する第 1 の窒化物半導体の In 組成を実施例 8 と逆にし、さらに p 側多層膜を構成する第 3 の窒化物半導体の Al 組成を逆にする。つまり第 1 の窒化物半導体膜の In を活性層に接近するに従って少なくなるようにし、第 3 の窒化物半導体膜の Al 組成を活性層から離れるに従って少なくなるようにする他は同様にして LED 素子を作製したところ、実施例 8 とほぼ同等の特性を有する LED 素子が得られた。

実施例 12.

15 実施例 1 において、n 側多層膜層 6 を成長させる際、アンドープ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させ、次にアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 2 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させる他は、実施例 1 と同様にして LED 素子を作製したところ、実施例 1 のものとほぼ同等の特性を有する素子が得られた。

20 実施例 13.

実施例 1 において、p 側多層膜層 8 を成長させる際、Mg ドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させ、次にアンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第 2 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長させる他は、実施例 1 と同様にして LED 素子を作製したところ、実施例 1
25 のものとほぼ同等の特性を有する素子が得られた。

実施例 14.

実施例 1 において、n 側多層膜層 6 を成長させる際、アンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜を 200 オングストローム成長させ、次にアンドープ GaN よりなる第 2 の窒化物半導体膜を 25 オングストローム成長さ

せる他は、すなわち、実施例1において第1の窒化物半導体膜の膜厚を200オングストロームとする以外は、実施例1と同様にしてLED素子を作製したところ、実施例1のものとはほぼ同等の特性を有する素子が得られた。

実施例15.

- 5 実施例1において、p側多層膜層8を成長させる際、Mgドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第1の窒化物半導体膜の膜厚を200オングストロームとした以外は、実施例1と同様にしてLED素子を作製したところ、実施例1のものとはほぼ同等の特性を有する素子が得られた。

実施例16.

- 10 本発明に係る実施例16の窒化物半導体素子は、図3に示すp側領域80とn側領域70との間に活性層56を有するレーザダイオードである。

本実施例16のレーザダイオードは、80 μm の厚さのGaN基板50の上に、

- (1) 3 μm の厚さのSiドープのGaNよりなるn型GaN層52、
 (2) 0.1 μm の厚さの $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層53、
 15 (3) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /n型GaNからなる超格子構造のn側クラッド層54、
 (4) Siがドープされた0.1 μm の厚さのn型GaN光ガイド層55、
 (5) $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ / $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 多重量子井戸構造の活性層56、
 (6) Mgがドープされた200Åの厚さの $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層57、
 (7) Mgがドープされた0.1 μm の厚さのp型GaN光ガイド層58、
 20 (8) $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ /p型GaNからなる超格子構造のp側クラッド層59、
 (9) Mgがドープされた0.05 μm の厚さのp型GaNコンタクト層60、
 以下の各層を成長させることにより作製される。

- 尚、n側クラッド層54は、25Åの厚さを有しSiがドープされたGaN膜と25Åの厚さを有しアンドープの $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 膜とが各240層、交互に積層されてなり、全体としてn型の導電性を示す。ここで、n側クラッド層54において、アンドープの $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 膜は、活性層に近づくに従って、Inの量が多くなるように、xの値を0.01~0.3の範囲で順次変化させることにより、n側クラッド層54の組成を傾斜させている。

また、活性層56は、それぞれ20Åの厚さを有しSiがドープされた4つの

$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層が、 50 \AA の厚さを有し Si がドーピングされた $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 障壁層と交互に設けられてなる。

さらに、p側クラッド層59は、 25 \AA の厚さを有し Mg がドーピングされた GaN 膜と 25 \AA の厚さを有しアンドーピングの $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 膜とが各120層、交互に積層されてなり、全体としてp型の導電性を示す。ここで、p側クラッド層59において、アンドーピングの $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 膜は、活性層に近づくに従って、 Al の量が少なくなるように、 y の値を $0.01\sim 0.2$ の範囲で順次変化させることにより、p側クラッド層59の組成を傾斜させている。

本実施例16では、上述の(1)～(9)の各層を形成した後、エッチングをすることにより、幅 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、長さ $450\text{ }\mu\text{m}$ のリッジ形状とし、p型コンタクト層60の上に Ni/Au からなるp側電極61を形成し、リッジの片側に位置するn型 GaN 層上に Ti/Al からなるn側電極を形成する。

尚、実施例16のレーザダイオードにおいて、リッジの両端面は、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ を2ペア形成することにより、両端面の反射係数を50%にした。

以上のように作製した実施例16の半導体レーザダイオードにおいて、閾値電流の小さい室温における連続発振が得られた。

以上のように、多層膜層(超格子層)を活性層から離れて形成しても、本実施例16に示すように良好な結果が得られる。

実施例17.

実施例17は、図4に示す、実施の形態2に関係した実施例である。

本実施例では、サファイア(C面)よりなる基板1をMOVPEの反応容器内にセットし、水素を流しながら、基板の温度を 1050°C まで上昇させ、基板のクリーニングを行う。

(バッファ層102)

続いて、温度を 510°C まで下げ、キャリアガスに水素、原料ガスにアンモニアとTMG(トリメチルガリウム)とを用い、基板1上に GaN よりなるバッファ層102を約 150 \AA の膜厚で成長させる。

(アンドーピング GaN 層103)

バッファ層102成長後、TMGのみ止めて、温度を 1050°C まで上昇させ

る。1050℃になったら、同じく原料ガスにTMG、アンモニアガスを用い、アンドープGaN層103を1.5μmの膜厚で成長させる。

(n側コンタクト層4)

5 続いて1050℃で、同じく原料ガスにTMG、アンモニアガス、不純物ガスにシランガスを用い、Siを $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGaNよりなるn側コンタクト層4を2.25μmの膜厚で成長させる。

(n側第1多層膜層105)

次にシランガスのみを止め、1050℃で、TMG、アンモニアガスを用い、アンドープGaN層を75オングストロームの膜厚で成長させ、続いて同温度に
10 てシランガスを追加しSiを $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGaN層を25オングストロームの膜厚で成長させる。このようにして、75オングストロームのアンドープGaN層からなるA層と、SiドープGaN層を有する25オングストロームのB層とからなるペアを成長させる。そしてペアを25層積層して2500オングストローム厚として、超格子構造の多層膜よりなるn側第1多層膜層
15 105を成長させる。

(n側第2多層膜層106)

次に、同様の温度で、アンドープGaNよりなる第2の窒化物半導体膜106bを40オングストローム成長させ、次に温度を800℃にして、TMG、TM
I、アンモニアを用い、アンドープ $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{N}$ よりなる第1の窒化物半導
20 体膜106aを20オングストローム成長させる。そしてこれらの操作を繰り返
し、第2+第1の順で交互に10層ずつ積層させ、最後にGaNよりなる第2の窒化物半導体膜106bを40オングストローム成長させた超格子構造の多層膜よりなるn側第2多層膜層106を640オングストロームの膜厚で成長させる。

(活性層7)

25 次に、アンドープGaNよりなる障壁層を200オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TM I、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ よりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を5層、井戸層を4層、交互に積層して、総膜厚1120オングストロームの多重量子井戸構造

よりなる活性層 7 を成長させる。

(p 側多層膜クラッド層 108)

次に、温度 1050℃ で TMG、TMA、アンモニア、Cp2Mg (シクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした p 型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる第 3 の窒化物半導体膜 108a を 40 オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を 800℃ にして、TMG、TMI、アンモニア、Cp2Mg を用い Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ よりなる第 4 の窒化物半導体膜 108b を 25 オングストロームの膜厚で成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第 3 + 第 4 の順で交互に 5 層ずつ積層し、最後に第 3 の窒化物半導体膜 108a を 40 オングストロームの膜厚で成長させた超格子構造の多層膜よりなる p 側多層膜クラッド層 108 を 365 オングストロームの膜厚で成長させる。

(p 側 GaN コンタクト層 9)

続いて 1050℃ で、TMG、アンモニア、Cp2Mg を用い、Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした p 型 GaN よりなる p 側コンタクト層 9 を 700 オングストロームの膜厚で成長させる。

反応終了後、温度を室温まで下げ、さらに窒素雰囲気中、ウェーハを反応容器内において、700℃ でアニーリングを行い、p 型層をさらに低抵抗化する。

アニーリング後、ウェーハを反応容器から取り出し、最上層の p 側コンタクト層 9 の表面に所定の形状のマスクを形成し、RIE (反応性イオンエッチング) 装置で p 側コンタクト層側からエッチングを行い、図 4 に示すように n 側コンタクト層 4 の表面を露出させる。

エッチング後、最上層にある p 側コンタクト層のほぼ全面に膜厚 200 オングストロームの Ni と Au を含む透光性の p 電極 11 と、その p 電極 11 の上にボンディング用の Au よりなる p パッド電極 11 を 0.5 μm の膜厚で形成する。一方、エッチングにより露出させた n 側コンタクト層 4 の表面には W と Al を含む n 電極 12 を形成して LED 素子とした。

この LED 素子は順方向電流 20 mA において、520 nm の純緑色発光を示し、V_f は 3.5 V で、従来の多重量子井戸構造の LED 素子に比較して、V_f

で1.0V近く低下し、出力は2.0倍以上に向上した。そのため、10mAで従来のLED素子とほぼ同等の特性を有するLEDが得られた。

5 なお、従来のLED素子の構成は、GaNよりなる第1のバッファ層の上に、
アンドープGaNよりなる第2のバッファ層、SiドープGaNよりなるn側コ
ンタクト層、実施例12と同一の多重量子井戸構造よりなる活性層、単一のMg
ドープAl_{0.1}Ga_{0.9}N層、MgドープGaNからなるp側コンタクト層を順に積
層したものである。

実施例18.

10 実施例17において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素
子を作製した。

(活性層7)

15 次に、アンドープGaNよりなる障壁層を250オングストロームの膜厚で成
長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TMI、アンモニアを用いアン
ドープIn_{0.3}Ga_{0.7}Nよりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させ
る。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を7層、井戸層
を6層、交互に積層して、総膜厚1930オングストロームの多重量子井戸構造
よりなる活性層7を成長させる。

得られたLED素子は、順方向電流20mAにおいて、470nmの純青色発
光を示し、実施例17と同様に良好な結果が得られる。

20 実施例19.

実施例17において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素
子を作製した。

(活性層7)

25 次に、アンドープGaNよりなる障壁層を250オングストロームの膜厚で成
長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TMI、アンモニアを用いアン
ドープIn_{0.3}Ga_{0.7}Nよりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させ
る。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を6層、井戸層
を5層、交互に積層して、総膜厚1650オングストロームの多重量子井戸構造
よりなる活性層7を成長させる。

得られたLED素子は、順方向電流20mAにおいて、470nmの純青色発光を示し、実施例17と同様に良好な結果が得られる。

実施例20.

5 実施例17において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(活性層7)

次に、アンドープGaNよりなる障壁層を250オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TM1、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$ よりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を7層、井戸層を6層、交互に積層して、総膜厚1930オングストロームの多重量子井戸構造よりなる活性層7を成長させる。

得られたLED素子は、順方向電流20mAにおいて、500nmの青緑色発光を示し、実施例17と同様に良好な結果が得られる。

15 実施例21.

実施例17において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(活性層7)

20 次に、アンドープGaNよりなる障壁層を250オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TM1、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$ よりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を4層、井戸層を3層、交互に積層して、総膜厚1090オングストロームの多重量子井戸構造よりなる活性層7を成長させる。

25 得られたLED素子は、順方向電流20mAにおいて、500nmの青緑色発光を示し、実施例17と同様に良好な結果が得られる。

実施例22.

実施例17において、n側第2多層膜層6を成長させない他は同様にしてLED素子を作製した。

得られたLED素子は、実施例17に比べやや素子特性及び発光出力が低いものの従来のLED素子と比較すると良好な発光出力を有している。

実施例23.

5 実施例17において、p側多層膜クラッド層8を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(p側単一膜クラッド層18)

10 温度1050℃でTMG、TMA、アンモニア、Cp2Mg（シクロペンタジエニルマグネシウム）を用い、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ よりなるp側単一膜クラッド層を300オングストロームの膜厚で成長させる。

得られたLED素子は、クラッド層を超格子とせず単一の層として成長させているが、その他の層構成との組み合わせにより、実施例1よりやや性能が劣るもののほぼ同様に良好な結果が得られる。また、単一層とすると、多層膜層にする場合に比べ製造工程が簡易化でき好ましい。

15 実施例24.

実施例17において、n側第1多層膜層105を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(n側第1多層膜層105)

20 アンドープGa層よりなるA層を100オングストロームの膜厚で成長させ、Siを $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープした $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなるB層を25オングストロームの膜厚で成長させてなるA層とB層の1ペアを20層積層して2500オングストローム厚としてn側第1多層膜層105を成長させる。

得られたLED素子は、実施例17とほぼ同等の特性を有し、良好な結果が得られる。

25 実施例25.

実施例17において、n側コンタクト層4を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(n側コンタクト層4)

1050℃で、原料ガスにTMG、アンモニアガス、不純物ガスにシランガス

を用い、Siを $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGaNよりなるn側コンタクト層4を6 μm の膜厚で成長させる。

得られたLED素子は、実施例17とほぼ同等の特性を有し、良好な結果が得られる。

5 実施例26.

実施例26は、図5に示された実施の形態3に関連した実施例である。

本実施例26ではまず、サファイア（表面がC面となるようにカットされたもの）よりなる基板1を反応容器内にセットし、容器内を水素で十分置換した後、水素を流しながら、基板の温度を1050℃まで上昇させ、基板のクリーニング
10 を行う。基板1にはサファイアC面の他、R面、A面を主面とするサファイア、その他、スピネル（MgAl₂O₄）のような絶縁性の基板の他、SiC（6H、4H、3Cを含む）、Si、ZnO、GaAs、GaN等の半導体基板を用いることができる。

（バッファ層202）

15 続いて、温度を510℃まで下げ、キャリアガスに水素、原料ガスにアンモニアとTMG（トリメチルガリウム）とを用い、基板1上にGaNよりなるバッファ層202を約200オングストロームの膜厚で成長させる。

（第1n側窒化物半導体層203）

20 バッファ層202成長後、TMGのみ止めて、温度を1050℃まで上昇させる。1050℃になったら、同じく原料ガスにTMG、アンモニアガスを用い、アンドープGaNよりなる第1n側窒化物半導体層203を5 μm の膜厚で成長させる。第1n側窒化物半導体層203はバッファ層202よりも高温、例えば900℃～1100℃で成長させることが好ましく、GaN以外でも、In_xAl_yGa_{1-x-y}N（ $0 \leq x$ 、 $0 \leq y$ 、 $x+y \leq 1$ ）で構成することもできるが、
25 好ましくはGaN又、X値が0.2以下のAl_xGa_{1-x}Nを用いるとより結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られやすい。また、バッファ層よりも厚膜で成長させることが好ましく、通常0.1 μm 以上の膜厚で成長させる。この層は通常アンドープ層とするためその性質は真性半導体に近く、抵抗率は $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$ よりも大きい。Si、Ge等のn型不純物を第2n側窒化物半導体層よりも

少ない量でドーピングして抵抗率を低下させた層としても良い。

(第2n側室化物半導体層204)

続いて1050℃で、TMG、アンモニアガスを用い、アンドープGaN層を20オングストロームの膜厚で成長させ、続いてシランガスを追加しSiを1
5 $\times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドーピングしたGaN層を20オングストロームの膜厚で成長させ、
そしてSiを止めてアンドープGaN層を20オングストロームの膜厚で成長させる。このようにして、20オングストロームのアンドープGaN層からなるA層と、SiドーピングGaN層を20オングストロームからなるB層とからなるペアを成長させる。そしてそのペアを積層して、変調ドーピングGaNよりなる1μm厚
10 の第2n側室化物半導体層204を成長させる。

(第3n側室化物半導体層205)

次にシランガスのみを止め、1050℃で同様にしてアンドープGaNよりなる第3n側室化物半導体層205を100オングストロームの膜厚で成長させる。この第3n側室化物半導体層205もGaN以外に $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$
15 $(0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1)$ で構成でき、その組成は特に問うものではないが、好ましくはGaN又はx値が0.2以下の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、あるいはy値が0.1以下の $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ とするとより結晶欠陥の少ない窒化物半導体層が得られる。InGaNを成長させると、その上にAlを含む窒化物半導体を成長させる場合に、Alを含む窒化物半導体層にクラックが入るのを防止することが
20 できる。

(活性層7)

次に、温度を800℃にして、キャリアガスを窒素に切り替え、TMG、TM1(トリメチルインジウム)、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 層を30オングストロームの膜厚で成長させて単一量子井戸構造を有する活性層7を
25 成長させる。なおこの層はInGaNよりなる井戸層を有する多重量子井戸構造としても良い。

(p側クラッド層108)

次に、温度を1050℃に上げ、TMG、TMA、アンモニア、 $\text{Cp}2\text{Mg}$ (シクロペンタジエチルマグネシウム)を用い、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドーピング

したp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる層を20 Åの厚さに成長させた後、TMG、アンモニア、 $\text{Cp}^*\text{2Mg}$ を用い、 Mg を $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 GaN よりなる層を20 Åの厚さに成長させる。以下同様の工程を交互に繰り返すことにより、総膜厚0.8 μmの超格子層からなるp側クラッド層を形成する。

5 (p側コンタクト層208)

次に、800℃において、アンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第1の窒化物半導体膜を30 Å、続いて、TMIを止め Mg を $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープした GaN よりなる第2の窒化物半導体膜を30 Å成長させる。そして交互に積層し、総膜厚600 Åのp側コンタクト層208を成長させる。

10 反応終了後、温度を室温まで下げ、さらに窒素雰囲気中、ウェーハを反応容器内において、700℃でアニーリングを行い、p側の各層をさらに低抵抗化する。

アニーリング後、ウェーハを反応容器から取り出し、最上層のp側コンタクト層208の表面に所定の形状のマスクを形成し、RIE（反応性イオンエッチング）装置でp側コンタクト層側からエッチングを行い、図5に示すように第2n側窒化物半導体層204の表面を露出させる。

エッチング後、最上層にあるp側コンタクト層のほぼ全面に膜厚200 ÅのNiとAuを含む透光性のp電極10と、そのp電極10の上にボンディング用のAuよりなるpパッド電極10を0.5 μmの膜厚で形成する。一方エッチングにより露出させた第2n側窒化物半導体層204の表面にはWとAlを含むn電極12を形成する。最後にp電極10の表面を保護するために SiO_2 よりなる絶縁膜12を図5に示すように形成した後、ウェーハをスクライブにより分離して350 μm角のLED素子とする。

このLED素子は20 mAにおいて順方向電圧3.2 V、520 nmの緑色発光を示し、20 mAにおけるVfを0.2～0.3 V低下させることができ、出力を10%以上向上させることができた。また、実施例21で示したLED素子を100個作製して、20 mAにおける順方向電圧Vfを測定した結果、それらのVfは、3.2 V～3.3 Vの範囲に分布しており、極めてバラツキを少なくできた。

実施例27.

実施例 26 において、p 側コンタクト層を成長させる際、アンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層と、 Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした GaN との積層順序を逆にした以外は、実施例 26 と同様にして LED 素子を作製した。

実施例 28.

- 5 実施例 26 において、p 側コンタクト層を成長させる際、第 2 の窒化物半導体の組成を $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層とする以外は、実施例 26 と同様にして LED 素子を作製した。

実施例 29.

- 10 実施例 26 において、p 側コンタクト層を成長させる際、第 2 の窒化物半導体膜を Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層とした以外は、実施例 26 と同様にして LED 素子を作製した。

実施例 30.

- 15 実施例 26 において、p 側コンタクト層を成長させる際、第 2 の窒化物半導体膜を Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層とした以外は、実施例 26 と同様にして LED 素子を作製した。

実施例 31.

実施例 26 において、p 側コンタクト層を成長させる際、第 1 の窒化物半導体膜に Mg を $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープした以外は、実施例 26 と同様にして LED 素子を作製した。

- 20 実施例 32.

実施例 26 において、p 側コンタクト層 208 を形成する際、アンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜に代えて、 Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ からなる第 1 の半導体膜を用い、 Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした GaN よりなる第 2 の窒化物半導体膜に代えて、 Mg を $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープした GaN よりなる第 2 の窒化物半導体膜を用い、かつ第 1 の窒化物半導体膜を最上層に形成した他は、実施例 26 と同様にして LED 素子を作製した。

実施例 33.

実施例 26 において、p 側コンタクト層 208 を以下のように形成する以外は、

実施例 26 と同様にして LED 素子を作製した。

すなわち、800℃において、アンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜を 30 Å 形成した後、続いて、TMI を除除に減少させて、組成が厚さ方向に $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ から GaN まで除除に変化する組成傾斜層を形成し、TMI が 0 になった後、Mg を $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープした GaN よりなる第 2 の窒化物半導体膜を 30 Å 成長させる。そして、今度は TMI を除除に増加させて、組成が厚さ方向に GaN から $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ まで除除に変化する組成傾斜層を形成した後、アンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第 1 の窒化物半導体膜を 30 Å 形成する。これを第 1 の窒化物半導体膜及び第 2 の窒化物半導体膜がそれぞれ 10 層になるまで繰り返すことにより、p 側コンタクト層 208 を成長させる。

以上の実施例 27～33 の LED 素子も、実施例 26 と同様、従来例に比較して良好な発光特性が得られた。

また、従来の InGaN からなる p 側コンタクト層では、 InGaN が比較的波長の短い領域で光の吸収が大きいために、該 p 側コンタクト層が黄色に着色し、活性層で発生した光の波長が、長波長側にシフトするという問題があった。しかしながら、本発明の p 側コンタクト層は、超格子構造としているので、単層で構成した従来の InGaN からなる p 側コンタクト層に比較して、波長の短い光の吸収率を小さくできる。従って、本発明における p 側コンタクト層は、光の長波長側へのシフトを防止でき、光の透過率も向上させることができる。

図 7 は、 GaN と InGaN からなる本発明の超格子構造の多層膜の、波長に対する光の透過率を示すグラフである。該多層膜は、 GaN (20 Å) と InGaN (20 Å) とを交互に 30 周期積層されてなり、Mg がドープされ $4 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ のキャリア濃度を有する p 型の層である。また、図 7 には、比較のために単層の $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ (膜厚 0.12 μm) からなる従来例の光透過率も示している。図 7 に示すように、本発明の超格子構造の多層膜と従来例の単層膜とは波長が 400 nm 付近の光に対する吸収率が顕著に相違し、本発明の超格子構造の多層膜は、波長が 400 nm 付近の光に対する透過率が優れていることがわかる。尚、図 7 に示す本発明の超格子構造の多層膜と従来例の単層膜の各低効率 ρ は、いずれも $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ であった。また、図 7 における透過率は、サフ

アイア基板の光の透過率を100%とした相対値で示した。

実施例34.

実施例34は、図8に示す実施の形態5に関係した実施例である。

5 実施例34ではまず、サファイア(C面)よりなる基板1をMOVPEの反応容器内にセットし、水素を流しながら、基板の温度を1050℃まで上昇させ、基板のクリーニングを行う。

(バッファ層102)

続いて、温度を510℃まで下げ、キャリアガスに水素、原料ガスにアンモニアとTMG(トリメチルガリウム)とを用い、基板1上にGaNよりなるバッファ層102を約150オングストロームの膜厚で成長させる。

(アンドープGaN層103)

10 バッファ層102成長後、TMGのみ止めて、温度を1050℃まで上昇させる。1050℃になったら、同じく原料ガスにTMG、アンモニアガスを用い、アンドープGaN層103を1.5μmの膜厚で成長させる。

15 (n側コンタクト層4)

続いて1050℃で、同じく原料ガスにTMG、アンモニアガス、不純物ガスにシランガスを用い、Siを $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGaNよりなるn側コンタクト層4を2.25μmの膜厚で成長させる。

(n側第1多層膜層305)

20 次にシランガスのみを止め、1050℃で、TMG、アンモニアガスを用い、アンドープGaNからなる下層305aを2000オングストロームの膜厚で成長させ、続いて同温度にてシランガスを追加しSiを $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGaNからなる中間層305bを300オングストロームの膜厚で成長させ、更に続いてシランガスのみを止め、同温度にてアンドープGaNからなる上層305cを50オングストロームの膜厚で成長させ、3層からなる総膜厚2350オングストロームの第1多層膜層5を成長させる。

(n側第2多層膜層306)

次に、同様の温度で、アンドープGaNよりなる第2の窒化物半導体膜を40オングストローム成長させ、次に温度を800℃にして、TMG、TMl、アン

モニアを用い、アンドープ $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{N}$ よりなる第1の窒化物半導体膜を200 Å 成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第2 + 第1の順で交互に10層ずつ積層させ、最後に GaN よりなる第2の窒化物半導体膜を400 Å 成長させた超格子構造の多層膜よりなるn側第2多層膜層306を640 Å の膜厚で成長させる。

(活性層7)

次に、アンドープ GaN よりなる障壁層を200 Å の膜厚で成長させ、続いて温度を800°Cにして、TMG、TMI、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ よりなる井戸層を30 Å の膜厚で成長させる。そして障壁 + 井戸 + 障壁 + 井戸 + ... + 障壁の順で障壁層を5層、井戸層を4層、交互に積層して、総膜厚1120 Å の多重量子井戸構造よりなる活性層7を成長させる。

(p側多層膜クラッド層8)

次に、温度1050°CでTMG、TMA、アンモニア、 $\text{Cp}2\text{Mg}$ (シクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、 Mg を $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる第3の窒化物半導体膜を40 Å の膜厚で成長させ、続いて温度を800°Cにして、TMG、TMI、アンモニア、 $\text{Cp}2\text{Mg}$ を用い Mg を $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープした $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ よりなる第4の窒化物半導体膜を25 Å の膜厚で成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第3 + 第4の順で交互に5層ずつ積層し、最後に第3の窒化物半導体膜を40 Å の膜厚で成長させた超格子構造の多層膜よりなるp側多層膜クラッド層8を365 Å の膜厚で成長させる。

(p側 GaN コンタクト層9)

続いて1050°Cで、TMG、アンモニア、 $\text{Cp}2\text{Mg}$ を用い、 Mg を $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 GaN よりなるp側コンタクト層9を700 Å の膜厚で成長させる。

反応終了後、温度を室温まで下げ、さらに窒素雰囲気中、ウェーハを反応容器内において、700°Cでアニーリングを行い、p型層をさらに低抵抗化する。

アニーリング後、ウェーハを反応容器から取り出し、最上層のp側コンタクト

層9の表面に所定の形状のマスクを形成し、RIE（反応性イオンエッチング）装置でp側コンタクト層側からエッチングを行い、図8に示すようにn側コンタクト層4の表面を露出させる。

エッチング後、最上層にあるp側コンタクト層のほぼ全面に膜厚200オングストロームのNiとAuを含む透光性のp電極11と、そのp電極11の上にボンディング用のAuよりなるpパッド電極11を0.5μmの膜厚で形成する。一方、エッチングにより露出させたn側コンタクト層4の表面にはWとAlを含むn電極12を形成してLED素子とした。

このLED素子は順方向電流20mAにおいて、520nmの純緑色発光を示し、Vfは3.5Vで、従来の多重量子井戸構造のLED素子に比較して、Vfで1.0V近く低下し、出力は2.0倍以上に向上した。そのため、10mAで従来のLED素子とほぼ同等の特性を有するLEDが得られた。更に、得られたLEDの静電耐圧をLED素子のn層及びp層の各電極より逆方向に徐々に電圧を加え測定したところ、従来の1.5倍以上となり良好な結果が得られた。

なお、従来のLED素子の構成は、GaNよりなる第1のバッファ層の上に、アンドープGaNよりなる第2のバッファ層、SiドープGaNよりなるn側コンタクト層、実施例27と同一の多重量子井戸構造よりなる活性層、単一のMgドープ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層、MgドープGaNからなるp側コンタクト層を順に積層したものである。

実施例35.

実施例34において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

（活性層7）

次に、アンドープGaNよりなる障壁層を250オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TM1、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を7層、井戸層を6層、交互に積層して、総膜厚1930オングストロームの多重量子井戸構造よりなる活性層7を成長させる。

得られたLED素子は、順方向電流20mAにおいて、470nmの純青色発光を示し、実施例34と同様に良好な結果が得られる。

実施例36.

5 実施例34において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(活性層7)

次に、アンドープGaNよりなる障壁層を250オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TMI、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・・+障壁の順で障壁層を6層、井戸層を5層、交互に積層して、総膜厚1650オングストロームの多重量子井戸構造よりなる活性層7を成長させる。

得られたLED素子は、順方向電流20mAにおいて、470nmの純青色発光を示し、実施例34と同様に良好な結果が得られる。

15 実施例37.

実施例34において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(活性層7)

20 次に、アンドープGaNよりなる障壁層を250オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を800℃にして、TMG、TMI、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$ よりなる井戸層を30オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・・+障壁の順で障壁層を7層、井戸層を6層、交互に積層して、総膜厚1930オングストロームの多重量子井戸構造よりなる活性層7を成長させる。

25 得られたLED素子は、順方向電流20mAにおいて、500nmの青緑色発光を示し、実施例34と同様に良好な結果が得られる。

実施例38.

実施例34において、活性層7を以下のように変える他は同様にしてLED素子を作製した。

(活性層 7)

次に、アンドープ GaN よりなる障壁層を 250 オングストロームの膜厚で成長させ、続いて温度を 800℃にして、TMG、TMI、アンモニアを用いアンドープ $In_{0.35}Ga_{0.65}N$ よりなる井戸層を 30 オングストロームの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を 4 層、井戸層を 3 層、交互に積層して、総膜厚 1090 オングストロームの多重量子井戸構造よりなる活性層 7 を成長させる。

得られた LED 素子は、順方向電流 20 mA において、500 nm の青緑色発光を示し、実施例 34 と同様に良好な結果が得られる。

10 実施例 39.

実施例 34 において、n 側第 2 多層膜層 306 を成長させない他は同様にして LED 素子を作製した。

得られた LED 素子は、実施例 34 に比べやや素子特性及び発光出力が低いものの、静電耐圧は実施例 27 とほぼ同様に良好となる。

15 実施例 40.

実施例 34 において、p 側多層膜クラッド層 8 を以下のように変える他は同様にして LED 素子を作製した。

(p 側単一膜クラッド層 8)

20 温度 1050℃で TMG、TMA、アンモニア、 Cp_2Mg (シクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、 Mg を $1 \times 10^{20}/cm^3$ ドープした p 型 $Al_{0.16}Ga_{0.84}N$ よりなる p 側単一膜クラッド層 8 を 300 オングストロームの膜厚で成長させる。

25 得られた LED 素子は、クラッド層を超格子とせず単一の層として成長させているが、その他の層構成との組み合わせにより、実施例 27 よりやや発光出力などの性能が劣るものの、静電耐圧がほぼ同様に良好な結果が得られる。また、単一層とすると、多層膜層にする場合に比べ製造工程が簡易化でき好ましい。

実施例 41.

実施例 34 において、n 側第 1 多層膜層 305 を以下のように各膜厚を変更する他は同様にして LED 素子を作製した。

(n側第1多層膜層305)

次にシランガスのみを止め、1050℃で、TMG、アンモニアガスを用い、
アンドープGaNからなる下層305aを3000オングストロームの膜厚で成長させ、続いて同温度にてシランガスを追加しSiを $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドー
5 プしたGaNからなる中間層305bを300オングストロームの膜厚で成長させ、更に続いてシランガスのみを止め、同温度にてアンドープGaNからなる上層305cを50オングストロームの膜厚で成長させ、3層からなる総膜厚3350の第1多層膜層5を成長させる。

得られたLED素子は、実施例34とほぼ同等の特性を有し、良好な結果が得
10 られる。

実施例42.

実施例41において、n側第1多層膜層305を以下のようにした他は実施例41と同様にしてLED素子を作製した。

すなわち、下層305aとして、アンドープ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を3000オング
15 ストロームの膜厚で成長させ、中間層305bとしてSiを $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドーブした $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を300オングストロームの膜厚で成長させ、上層305cとしてアンドープ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を50オングストロームの膜厚で成長させる。以上のようにして得られたLED素子は、実施例41とほぼ同等の特性を有し、良好な結果が得られた。

20 比較例1.

実施例34において、n側第1多層膜層305を構成するアンドープGaNからなる下層305aを形成しない他は同様にしてLED素子を作製した。

得られたLED素子は、実施例34に比べ、静電耐圧が著しく低下し、リーク電流及びVfに関する特性も十分満足できる値ではなかった。

25 比較例2.

実施例34において、n側第1多層膜層305を構成するSiドーブGaNからなる中間層305bを形成しない他は同様にしてLED素子を作製した。

得られたLED素子は、実施例34に比べ、発光出力及び静電耐圧が大きく低下し、その他の特性も十分満足できる値ではなかった。

比較例 3.

実施例 3 4 において、n 側第 1 多層膜層 3 0 5 を構成するアンドープ G a N からなる上層 3 0 5 c を形成しない他は同様にして L E D 素子を作製した。

得られた L E D 素子は、実施例 3 4 に比べ、リーク電流が増加し、その他の特性も十分満足できる値ではなかった。

実施例 4 3.

実施例 4 3 は、本発明に係る実施の形態 6 に関連した実施例である。

(基板 1)

サファイア (C 面) よりなる基板 1 を M O V P E の反応容器内にセットし、水を流しながら、基板の温度を 1 0 5 0 °C まで上昇させ、基板のクリーニングを行う。

(バッファ層 2)

続いて、温度を 5 1 0 °C まで下げ、キャリアガスに水素、原料ガスにアンモニアと T M G (トリメチルガリウム) とを用い、基板 1 上に G a N よりなるバッファ層 2 を約 2 0 0 オングストロームの膜厚で成長させる。なおこの低温で成長させる第 1 のバッファ層 2 は基板の種類、成長方法等によっては省略できる。

(アンドープ G a N 層 3)

バッファ層 2 成長後、T M G のみ止めて、温度を 1 0 5 0 °C まで上昇させる。1 0 5 0 °C になったら、同じく原料ガスに T M G 、アンモニアガスを用い、アンドープ G a N 層 3 を 1 μ m の膜厚で成長させる。

(n 型コンタクト層 4)

続いて 1 0 5 0 °C で、同じく原料ガスに T M G 、アンモニアガス、不純物ガスにシランガスを用い、S i を $3 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープした G a N よりなる n 型コンタクト層を 3 μ m の膜厚で成長させる。

25 (アンドープ G a N 層 5)

次にシランガスのみを止め、1 0 5 0 °C で同様にしてアンドープ G a N 層 5 を 1 0 0 オングストロームの膜厚で成長させる。

(n 型多層膜層 6)

次に、温度を 8 0 0 °C にして、T M G 、T M I 、アンモニアを用い、アンドー

5 プ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ よりなる第2の窒化物半導体膜を250 Å成長させ、続いて温度を上昇させ、その上にアンドープ GaN よりなる第1の窒化物半導体膜を250 Å成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第2+第1の順で交互に10層ずつ積層した超格子構造よりなるn型多層膜を500 Åの膜厚で成長させる。

(活性層7)

次に、アンドープ GaN よりなる障壁層を200 Åの膜厚で成長させ、続いて温度を800°Cにして、TMG、TMI、アンモニアを用いアンドープ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ よりなる井戸層を30 Åの膜厚で成長させる。そして障壁+井戸+障壁+井戸・・・+障壁の順で障壁層を5層、井戸層4層交互に積層して、総膜厚1120 Åの多重量子井戸構造よりなる活性層7を成長させる。

(p型多層膜層8)

次に、TMG、TMA、アンモニア、 $\text{Cp}^*\text{2Mg}$ (シクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、 Mg を $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第3の窒化物半導体膜を250 Åの膜厚で成長させ、続いて $\text{Cp}^*\text{2Mg}$ 、TMAを止めアンドープ GaN よりなる第4の窒化物半導体膜を250 Åの膜厚で成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第3+第4の順で交互に4層ずつ積層した超格子よりなるp型多層膜層8を200 Åの膜厚で成長させる。

(p型コンタクト層9)

続いて1050°Cで、TMG、アンモニア、 $\text{Cp}^*\text{2Mg}$ を用い、 Mg を $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 GaN よりなるp型コンタクト層8を700 Åの膜厚で成長させる。

25 反応終了後、温度を室温まで下げ、さらに窒素雰囲気中、ウェーハを反応容器内において、700°Cでアニーリングを行い、p型層をさらに低抵抗化する。

アニーリング後、ウェーハを反応容器から取り出し、最上層のp型コンタクト層9の表面に所定の形状のマスクを形成し、RIE (反応性イオンエッチング) 装置でp型コンタクト層側からエッチングを行い、図1に示すようにn型コンタ

クト層4の表面を露出させる。

エッチング後、最上層にあるp型コンタクト層のほぼ全面に膜厚200オングストロームのNiとAuを含む透光性のp電極10と、そのp電極10の上にボンディング用のAuよりなるpパッド電極11を0.5μmの膜厚で形成する。

5 一方、エッチングにより露出させたn型コンタクト層4の表面にはWとAlを含むn電極12を形成してLED素子とした。

このLED素子は順方向電圧20mAにおいて、520nmの純緑色発光を示し、Vfは3.5Vしかなく、従来の多重量子井戸構造のLED素子に比較して、Vfで0.5V近く低下し、発光出力は2倍以上に向上した。そのため、10mAで従来のLED素子とほぼ同等の特性を有するLEDが得られた。更に得られた素子は、静電耐圧が従来の素子に比べて約1.2倍以上良好となる。

15 なお、従来のLED素子の構成は、GaNよりなる第1のバッファ層の上に、アンドープGaNよりなる第2のバッファ層、SiドープGaNよりなるn型コンタクト層、実施例1と同一の多重量子井戸構造よりなる活性層、単一のMgドープAl_{0.1}Ga_{0.9}N層、MgドープGaNからなるp型コンタクト層を順に積層したものである。

実施例44.

20 実施例43において、n型多層膜層6を成長する際に、第1の窒化物半導体膜のみを、Siを $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたGaNとして成長させる他は同様にして、LED素子を作製した。得られたLED素子は、実施例43とほぼ同等の良好な素子特性を有している。

実施例45.

25 実施例43において、n型多層膜層6を成長する際に、第2の窒化物半導体膜をSiを $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたIn_{0.03}Ga_{0.97}層とし、第1の窒化物半導体膜を、Siを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたGaNとする他は同様にしてLED素子を製造した。得られたLED素子は、20mAにおいてVfは3.4V、出力は従来のものに比較して、1.5倍以上と優れた特性を示した。また静電耐圧は、実施例43と同様に良好である。

実施例46.

実施例43において、p型多層膜層8を成長する際に、第4の窒化物半導体膜にMgを $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型GaN層を成長させる他は同様にしてLED素子を作製したところ、実施例43とほぼ同等の特性を有するLED素子が得られた。

5 実施例47.

実施例43において、p型多層膜層8を成長する際に、アンドープAl_{0.1}Ga_{0.9}Nよりなる第3の窒化物半導体膜を25オングストロームと、アンドープGaNよりなる第4の窒化物半導体膜を25オングストロームとでそれぞれ2層ずつ交互に積層して総膜厚100オングストロームとする他は同様にしてLED素子を作製したところ、実施例43とほぼ同等の特性を有するLED素子が得られた。

10 実施例48.

実施例43において、アンドープGaN層5に変えて多層膜層を形成し、さらに、以下に示す各層を以下のように変更する他は同様にして、LED素子を製造する。

15 (n側コンタクト層4)

続いて1050℃で、同じく原料ガスにTMG、アンモニアガス、不純物ガスにシランガスを用い、Siを $6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGaNよりなるn側コンタクト層4を2.25μmの膜厚で成長させる。

(多層膜層)

20 次にシランガスのみを止め、1050℃で、TMG、アンモニアガスを用い、アンドープGaNからなる下層305aを2000オングストロームの膜厚で成長させ、続いて同温度にてシランガスを追加しSiを $6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGaNからなる中間層305bを300オングストロームの膜厚で成長させ、更に続いてシランガスのみを止め、同温度にてアンドープGaNからなる上層305cを50オングストロームの膜厚で成長させ、3層からなる総膜厚2350オングストロームの多層膜層を成長させる。

25 (n型多層膜層6)

次に、同様の温度で、アンドープGaNよりなる第1の窒化物半導体膜を40オングストローム成長させ、次に温度を800℃にして、TMG、TMI、アン

モニアを用い、アンドープ $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ よりなる第1の窒化物半導体膜を200 Å 成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第1 + 第2の順で交互に10層ずつ積層させ、最後に GaN よりなる第1の窒化物半導体膜を400 Å 成長させた超格子構造の多層膜よりなるn型多層膜層6を640 Å の膜厚で成長させる。

(p型多層膜層8)

次に、温度1050°CでTMG、TMA、アンモニア、 $\text{Cp}2\text{Mg}$ (シクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、 Mg を $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる第3の窒化物半導体膜を400 Å の膜厚で成長させ、続いて温度を800°Cにして、TMG、TMI、アンモニア、 $\text{Cp}2\text{Mg}$ を用い Mg を $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープした $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ よりなる第4の窒化物半導体膜を250 Å の膜厚で成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、第3 + 第4の順で交互に5層ずつ積層し、最後に第3の窒化物半導体膜を400 Å の膜厚で成長させた超格子構造の多層膜よりなるp型多層膜層8を365 Å の膜厚で成長させる。

得られたLED素子は、実施例43とほぼ同様に良好な発光出力及びVfを示し、更に、LED素子のn層及びp層の各電極より逆方向に徐々に電圧を加え静電耐圧を測定したところ、実施例43の比較に用いた従来の素子に比べて1.5倍以上となり、実施例43より静電耐圧は良好な結果が得られた。

以上の実施例において、LED素子である窒化物半導体発光素子を用いて説明したが、本発明はLED素子に限定されるわけではなく、レーザダイオード素子等の他の発光素子に適用することができる。

また、本発明は発光素子に限定されるものではなく、窒化物半導体を用いて構成される、太陽電池、光センサ等の受光素子、あるいはトランジスタ、パワーデバイス等の電子デバイス等にも適用することができる。

産業上の利用の可能性

以上説明したように、本発明によれば、窒化物半導体素子、特に窒化物半導体発光素子において、低電流で従来のLED素子と同等又はそれ以上の出力が得ら

れ、発光出力のさらなる向上も可能である。

また、本発明により、静電耐圧特性を向上させることができ、信頼性の高い窒化物半導体素子を提供することができ、適用可能な応用製品の範囲を拡大させるものである。

- 5 また、本発明は、発光素子に限らず、受光素子、太陽電池等、窒化物半導体を用いたあらゆる電子デバイスに適用可能である。

請求の範囲

1. 複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

5 前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、Inを含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化物半導体膜とが積層されたn側多層膜層を有し、前記第1の窒化物半導体膜、または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の膜厚が100オングストローム以下であることを特徴とする窒化物半導体素子。

2. 前記第1の窒化物半導体膜が $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) よりなり、前記第2の窒化物半導体膜が $In_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y < 1$, $y < x$) よりなることを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体素子。

3. 前記第1の窒化物半導体膜または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の膜厚が、近接する第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜同士で互いに異なることを特徴とする請求項1または2に記載の窒化物半導体素子。

4. 前記第1の窒化物半導体膜、または前記第2の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方のIII族元素の組成が、近接する第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜の同一III族元素の組成同士で互いに異なることを特徴とする請求項1または2に記載の窒化物半導体素子。

20 5. 前記n側多層膜層が活性層に接して形成されていることを特徴とする請求項1乃至4の内のいずれか1項に記載の窒化物半導体素子。

6. 前記第1の窒化物半導体膜および第2の窒化物半導体膜がアンドープであることを特徴とする請求項1乃至5の内のいずれか1項に記載の窒化物半導体素子。

25 7. 前記第1の窒化物半導体膜または第2の窒化物半導体膜のいずれか一方に、n型不純物がドーピングされていることを特徴とする請求項1乃至5の内のいずれか1項に記載の窒化物半導体素子。

8. 前記第1の窒化物半導体膜および第2の窒化物半導体膜の両方にn型不純物がドーピングされていることを特徴とする請求項1乃至5の内のいずれか1項に

記載の窒化物半導体素子。

9. 前記 p 側領域の窒化物半導体層として、Al を含む第 3 の窒化物半導体膜と、第 3 の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第 4 の窒化物半導体膜とが積層されてなる p 側多層膜層を有し、前記第 3 の窒化物半導体膜と前記第 4 の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の膜厚が 100 オングストローム以下であることを特徴とする請求項 1 乃至 8 の内のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。

10. 前記第 3 の窒化物半導体膜が $Al_aGa_{1-a}N$ ($0 < a \leq 1$) よりなり、前記第 4 の窒化物半導体膜が $In_bGa_{1-b}N$ ($0 \leq b < 1$ 、 $b < a$) よりなることを特徴とする請求項 9 に記載の窒化物半導体素子。

11. 前記第 3 の窒化物半導体膜、または前記第 4 の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の膜厚が、近接する第 3 の窒化物半導体膜または第 4 の窒化物半導体膜同士で互いに異なることを特徴とする請求項 9 または 10 に記載の窒化物半導体素子。

12. 前記第 3 の窒化物半導体膜、または前記第 4 の窒化物半導体膜の内の少なくとも一方の III 族元素の組成が、近接する第 3 の窒化物半導体膜または第 4 の窒化物半導体膜の同一 III 族元素の組成同士で互いに異なることを特徴とする請求項 9 または 10 に記載の窒化物半導体素子。

13. 前記 p 側多層膜層が活性層に接して形成されていることを特徴とする請求項 9 乃至 12 の内のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。

14. 前記第 3 の窒化物半導体膜および第 4 の窒化物半導体膜がアンドープであることを特徴とする請求項 9 乃至 13 の内のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。

15. 前記第 3 の窒化物半導体膜または第 4 の窒化物半導体膜のいずれか一方に、p 型不純物がドーピングされていることを特徴とする請求項 9 乃至 13 の内のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。

16. 前記第 3 の窒化物半導体膜および第 4 の窒化物半導体膜の両方に p 型不純物がドーピングされていることを特徴とする請求項 9 乃至 13 の内のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。

17. 複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と、複数の窒化物半導体層を

有する p 側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、n 型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされかつ互いに異なるバンドギャップエネルギーを有する少なくとも 2 種類の窒化物半導体膜が積層されてなる n 側第 1 多層膜層であり、

5 前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、それぞれ p 型不純物がドーピングされてなりかつ互いに異なるバンドギャップエネルギーが異なる第 3 と第 4 の窒化物半導体膜が積層されてなる p 側多層膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $In_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする窒化物半導体素子。

10 18. 複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と、複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、n 型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされている同一組成を有する少なくとも 2 種類の窒化物半導体膜が積層されてなる n 側第 1 多層膜層であり、

15 前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、それぞれ p 型不純物がドーピングされてなりかつ互いに異なるバンドギャップエネルギーが異なる第 3 と第 4 の窒化物半導体膜が積層されてなる p 側多層膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $In_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする窒化物半導体素子。

20 19. 前記第 3 の窒化物半導体膜の p 型不純物濃度と前記第 4 の窒化物半導体膜の p 型不純物濃度とが互いに異なる請求項 17 又は 18 に記載の窒化物半導体素子。

20. 前記第 3 の窒化物半導体膜の p 型不純物濃度と前記第 4 の窒化物半導体膜の p 型不純物濃度とが互いに同一である請求項 17 又は 18 に記載の窒化物
25 半導体素子。

21. 複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と、複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、n 型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされている同一組成を有する少なくとも 2 種類の窒化物半導体膜

が積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、p型不純物を含み $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなるp側単一膜クラッド層であり、

5 前記活性層が、 $In_aGa_{1-a}N$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする窒化物半導体素子。

22. 前記n側第1多層膜層は、それぞれGaNからなりn型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされた2種類の窒化物半導体膜が積層されてなる請求項18又は21記載の窒化物半導体素子。

23. 複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を
10 有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、n型不純物が互いに異なる濃度でドーピングされかつバンドギャップエネルギーが異なる少なくとも2種類の窒化物半導体膜が積層されてなるn側第1多層膜層であり、

15 前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、p型不純物を含み $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなるp側単一膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $In_aGa_{1-a}N$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする窒化物半導体素子。

24. 前記n側第1多層膜層と活性層との間に、Inを含む第1の窒化物半導体膜と、その第1の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第2の窒化物半導体
20 膜とが積層されたn側第2多層膜層を有する請求項17～23のうちのいずれか1項に記載の窒化物半導体素子。

25. 前記n側領域に、前記n側第1多層膜層より基板側に、n型不純物を含むn側コンタクト層を有する請求項17～24のうちのいずれか1項に記載の窒化物半導体素子。

26. 前記n側コンタクト層が、アンドープGaN層の上に形成されてなることを特徴とする請求項25に記載の窒化物半導体素子。

27. 前記窒化物半導体素子において、前記アンドープGaN層が低温成長させた $Ga_dAl_{1-d}N$ ($0 < d \leq 1$) からなるバッファ層上に形成され、更に前記p側多層膜クラッド層又はp側単一膜クラッド層上にp型不純物としてMgを

含むp側Ga_{1-x}Nコンタクト層を形成してなる請求項26に記載の窒化物半導体素子。

28. p型コンタクト層を含む複数の窒化物半導体層を有するp側領域と複数の窒化物半導体層からなるn側領域との間に活性層を備えた窒化物半導体素子において、

前記p型コンタクト層は、互いに組成の異なる第1と第2の窒化物半導体膜とを含む膜が順次積層された超格子構造を有し、前記2つの窒化物半導体膜のうち少なくとも第1の窒化物半導体膜はInを含んでいることを特徴とする窒化物半導体素子。

29. 前記第1の窒化物半導体膜と前記第2の窒化物半導体膜との間に、前記第1の窒化物半導体膜の組成から前記第2の窒化物半導体膜の組成へと組成が連続的に変化する組成傾斜層を形成した請求項28記載の窒化物半導体素子。

30. 前記第1と第2の窒化物半導体膜はそれぞれInを含んでなり、前記第1の窒化物半導体膜のInの含有量が前記第2の窒化物半導体膜のInの含有量に比較して大きい請求項28又は29記載の窒化物半導体素子。

31. 前記第1の窒化物半導体膜はIn_xGa_{1-x}Nからなり、前記第2の窒化物半導体膜はAl_yGa_{1-y}N (0 ≤ y < 1) からなる請求項28又は29記載の窒化物半導体素子。

32. 前記第1の窒化物半導体膜と前記第2の窒化物半導体膜のうちのいずれか一方にはp型不純物がドーピングされ、他方には、p型不純物がドーピングされていない請求項28～31のうちのいずれか1つに記載の窒化物半導体素子。

33. 前記第1の窒化物半導体膜と前記第2の窒化物半導体膜のうちのいずれか一方には1 × 10¹⁹/cm³～5 × 10²¹/cm³の範囲のp型不純物がドーピングされ、他方には5 × 10¹⁸/cm³～5 × 10¹⁹/cm³の範囲であってかつ前記一方の窒化物半導体膜より少ない量のp型不純物がドーピングされている請求項28～31のうちのいずれか1つに記載の窒化物半導体素子。

34. 前記第1の窒化物半導体膜が最表面に形成され、かつp側電極が前記最表面に形成された該第1の窒化物半導体膜に接するように形成されている請求項28～33のうちのいずれか1つに記載の窒化物半導体素子。

35. 前記第1の窒化物半導体膜のp型不純物濃度は、前記第2の窒化物半導体膜より大きい請求項34記載の窒化物半導体素子。

36. 前記活性層と前記p型コンタクト層との間にAlを含む窒化物半導体からなるp型クラッド層を備えた請求項28～35のうちのいずれか1つに記載の窒化物半導体素子。

37. 前記p型クラッド層は、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$) からなる層と $In_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y < 1$) からなる層とが交互に積層された超格子構造を有する請求項36に記載の窒化物半導体素子。

38. 複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域との間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、アンドープの窒化物半導体膜からなる下層、n型不純物がドーピングされている窒化物半導体膜からなる中間層、及びアンドープの窒化物半導体膜からなる上層の少なくとも3層が順に積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記p側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、それぞれp型不純物がドーピングされてなりかつ互いにバンドギャップエネルギーが異なる第3と第4の窒化物半導体膜が積層されてなるp側多層膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $In_aGa_{1-a}N$ ($0 \leq a < 1$) よりなる多重量子井戸構造であることを特徴とする窒化物半導体素子。

39. 前記第3の窒化物半導体膜のp型不純物濃度と前記第4の窒化物半導体膜のp型不純物濃度とが互いに異なる請求項38記載の窒化物半導体素子。

40. 前記第3の窒化物半導体膜のp型不純物濃度と前記第4の窒化物半導体膜のp型不純物濃度とが同一である請求項38記載の窒化物半導体素子。

41. 複数の窒化物半導体層を有するn側領域と、複数の窒化物半導体層を有するp側領域の間に活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記n側領域の少なくとも1つの窒化物半導体層は、アンドープの窒化物半導体からなる下層、n型不純物がドーピングされている窒化物半導体からなる中間層、及びアンドープの窒化物半導体からなる上層の少なくとも3層が順に積層されてなるn側第1多層膜層であり、

前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、p 型不純物を含み $\text{Al}_{1-b}\text{Ga}_b\text{N}$ ($0 \leq b \leq 1$) よりなる p 側単一膜クラッド層であり、

前記活性層が、 $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ ($0 \leq a < 1$) を含んでなる多重量子井戸構造であることを特徴とする窒化物半導体素子。

5 4 2. 前記 n 側第 1 多層膜層が、膜厚 100～10000 オングストロームのアンダーの窒化物半導体からなる下層、膜厚 50～1000 オングストロームの n 型不純物がドーピングされている窒化物半導体からなる中間層、及び膜厚 25～1000 オングストロームのアンダーの窒化物半導体からなる上層からなることを特徴とする請求項 3 8 又は 3 9 に記載の窒化物半導体素子。

10 4 3. 前記 n 側領域において、前記 n 側第 1 多層膜層と活性層との間に、1 n を含む第 1 の窒化物半導体膜と、その第 1 の窒化物半導体膜と異なる組成を有する第 2 の窒化物半導体膜とが積層された n 側第 2 多層膜層を有することを特徴とする請求項 3 8～4 2 のいずれかに記載の窒化物半導体素子。

15 4 4. 前記 n 側領域において、前記 n 側第 1 多層膜層と基板との間に、n 型不純物を含む n 側コンタクト層を有することを特徴とする請求項 3 8～4 3 のいずれか 1 つに記載の窒化物半導体素子。

4 5. 前記 n 側コンタクト層が、アンダー Ga_bN 層の上に形成されていることを特徴とする請求項 4 4 に記載の窒化物半導体素子。

20 4 6. 前記窒化物半導体素子において、前記アンダー Ga_bN 層が低温成長させた $\text{Ga}_d\text{Al}_{1-d}\text{N}$ ($0 < d \leq 1$) からなるバッファ層上に形成され、更に前記 p 側多層膜クラッド層又は p 側単一膜クラッド層上に p 型不純物として Mg を含む p 側 Ga_bN コンタクト層を形成してなることを特徴とする請求項 4 5 に記載の窒化物半導体素子。

25 4 7. 複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に、活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる n 型多層膜層であり、

前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる p 型多層膜層でありかつ、

前記 n 型多層膜層を構成する組成と、p 型多層膜層を構成する組成とが異なることを特徴とする窒化物半導体素子。

48. 複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に、活性層を有する窒化物半導体素子において、

5 前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる n 型多層膜層であり、

前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる p 型多層膜層でありかつ、

10 前記 n 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数と、p 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数とが異なることを特徴とする窒化物半導体素子。

49. 複数の窒化物半導体層を有する n 側領域と複数の窒化物半導体層を有する p 側領域との間に、活性層を有する窒化物半導体素子において、

前記 n 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる n 型多層膜層であり、

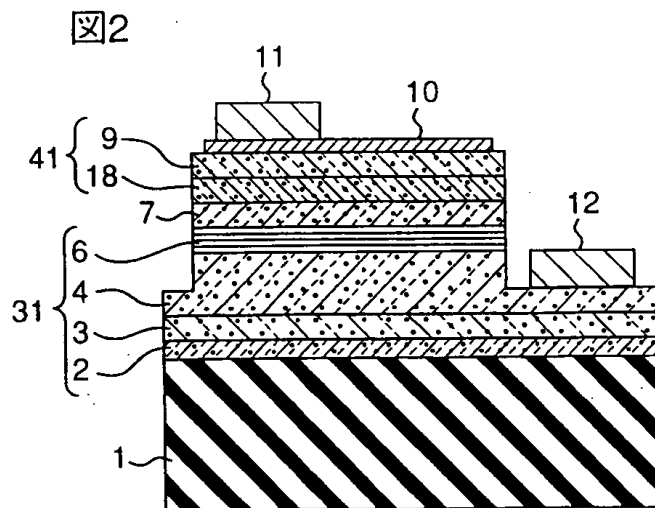
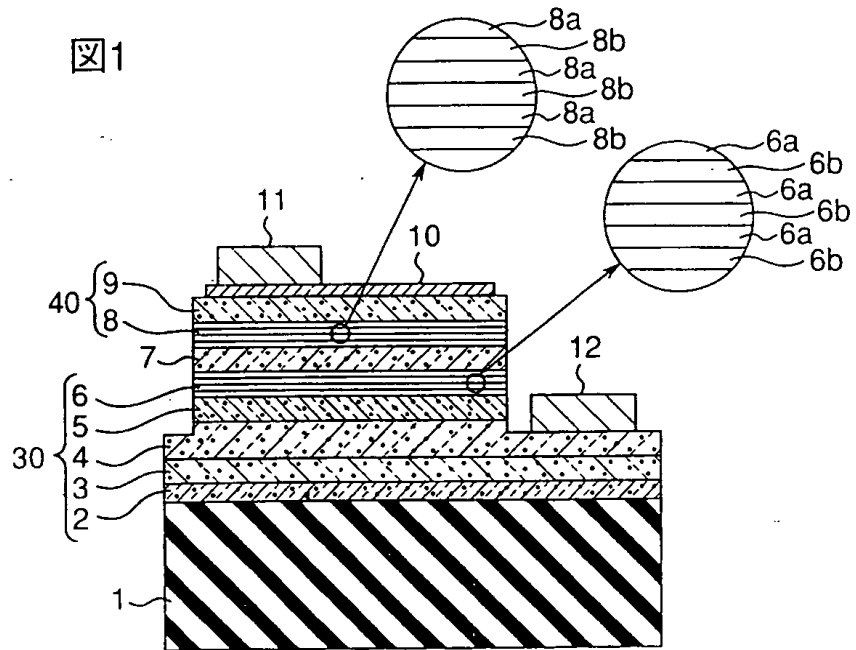
15 前記 p 側領域の少なくとも 1 つの窒化物半導体層は、複数の窒化物半導体膜が積層されてなる p 型多層膜層でありかつ、

前記 n 型多層膜層を構成する組成と、p 型多層膜層を構成する組成とが異なり、かつ前記 n 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数と、p 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数とが異なることを特徴とする窒化物半導体素子。

20 50. 前記 p 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数が、n 型多層膜層を構成する窒化物半導体膜の積層数より少ないことを特徴とする請求項 47～49 のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。

25 51. 前記 n 型多層膜層が、 $Al_zGa_{1-z}N$ ($0 \leq z < 1$) と $In_pGa_{1-p}N$ ($0 < p < 1$) とを含んでなり、前記 p 型多層膜層が、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) と $In_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y < 1$) とを含んでなることを特徴とする請求項 47～50 のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。

52. 前記 p 型多層膜層及び／又は n 型多層膜層が、変調ドーピングされていることを特徴とする請求項 47～51 のいずれか 1 項に記載の窒化物半導体素子。



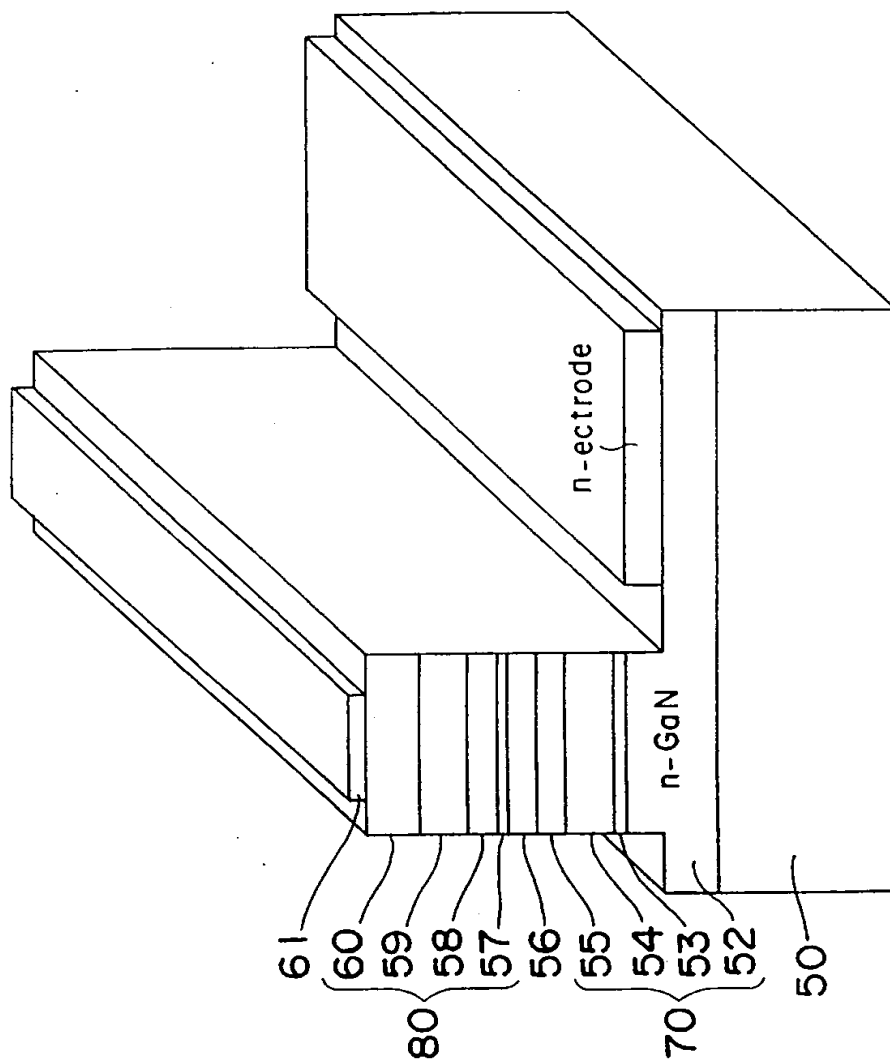
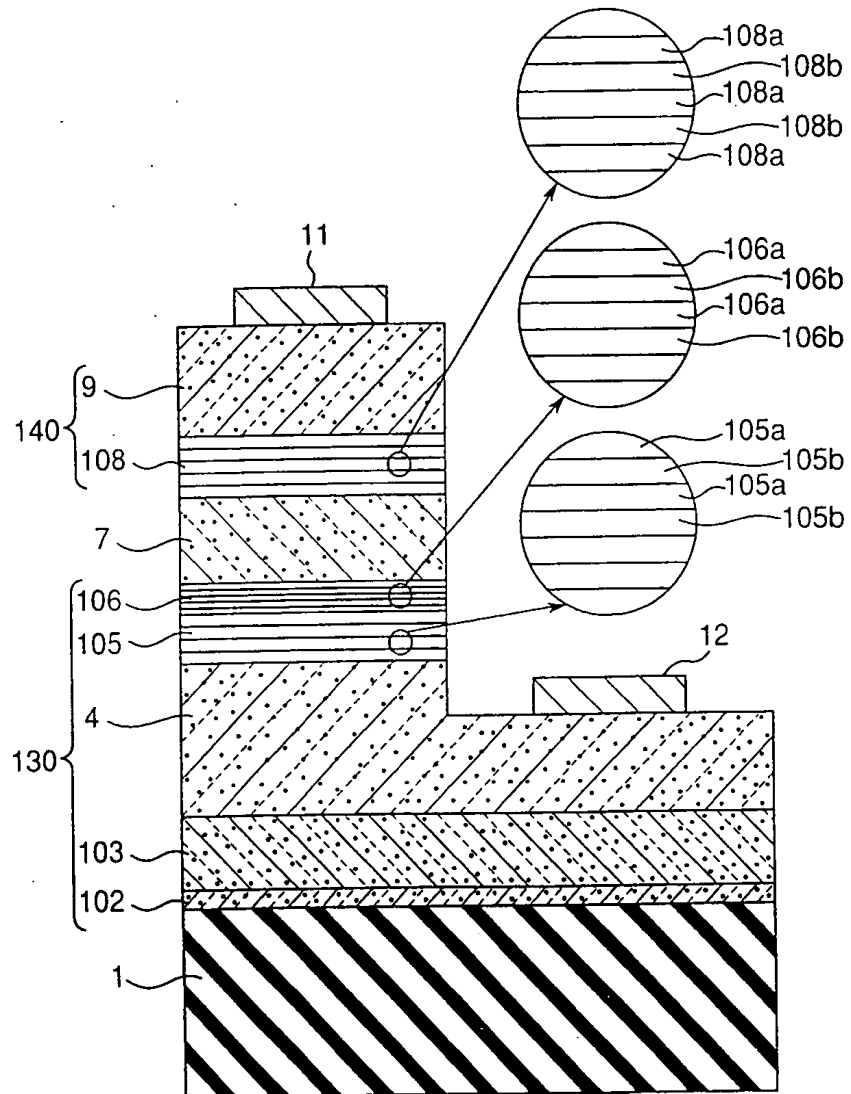


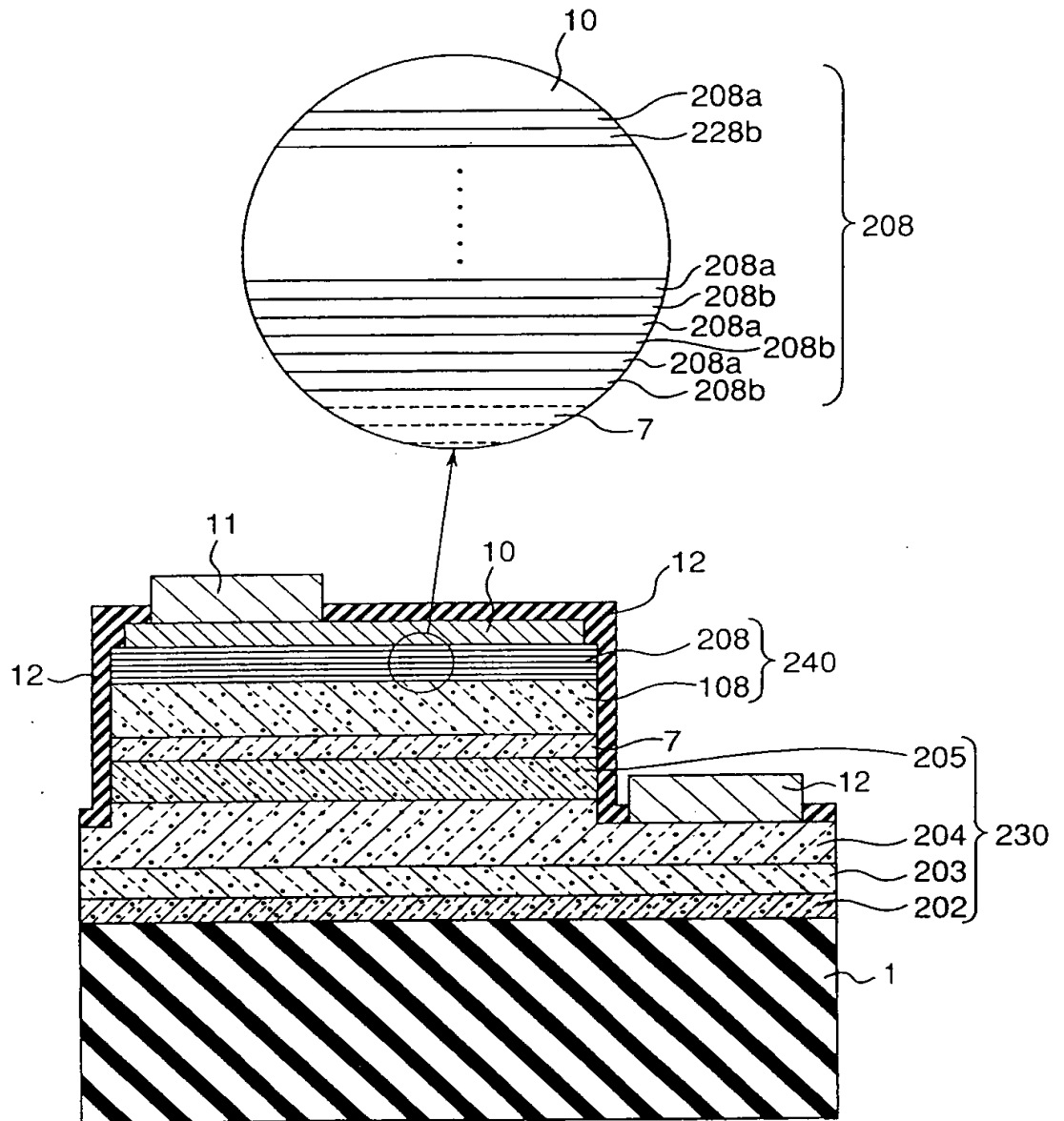
图 3

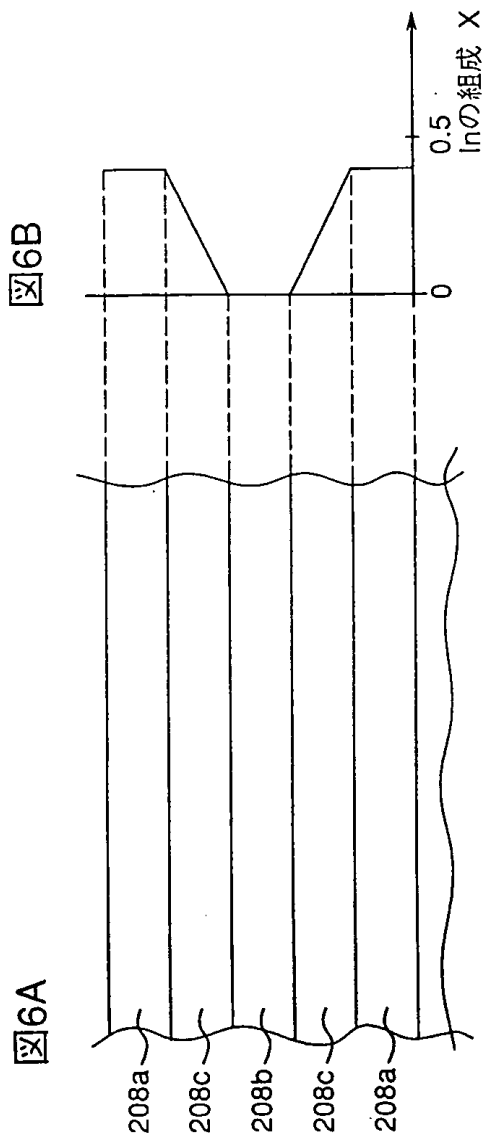
図4



4/10

図5





6/10

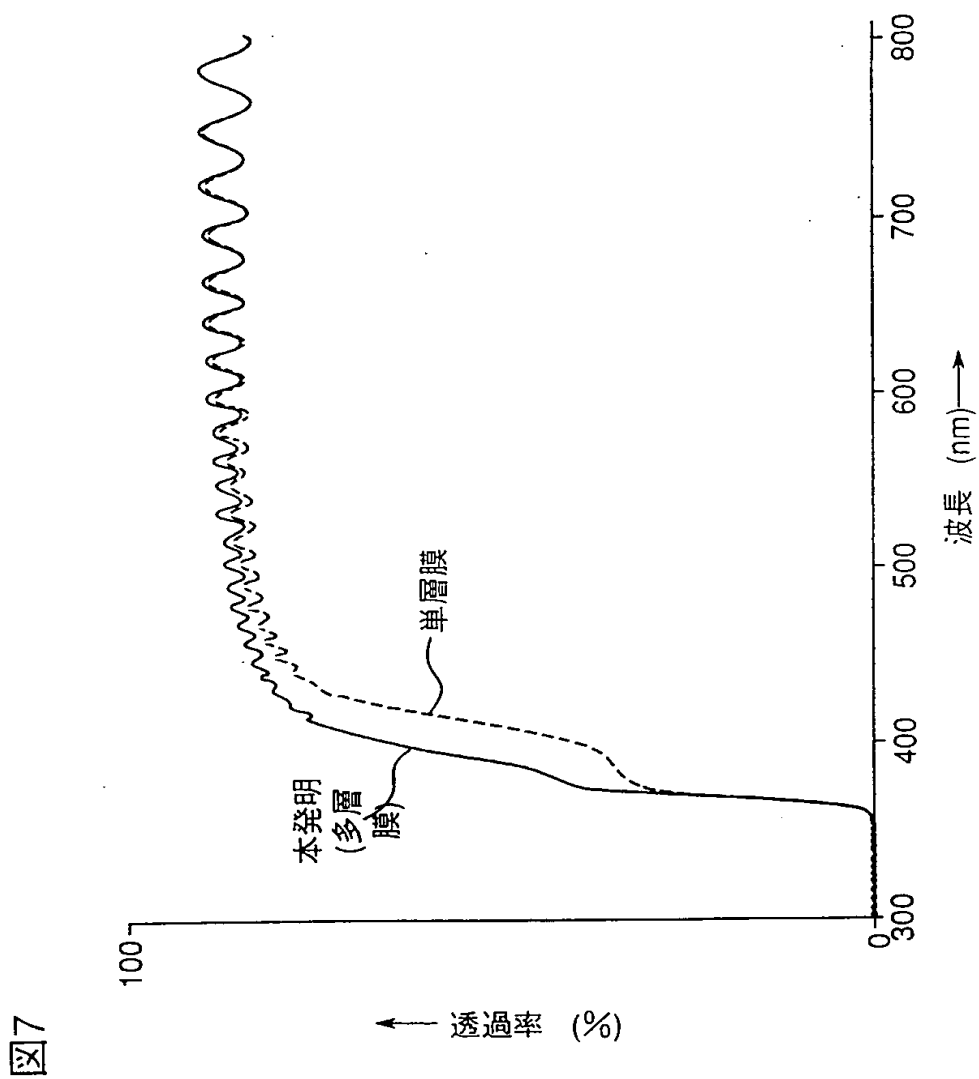
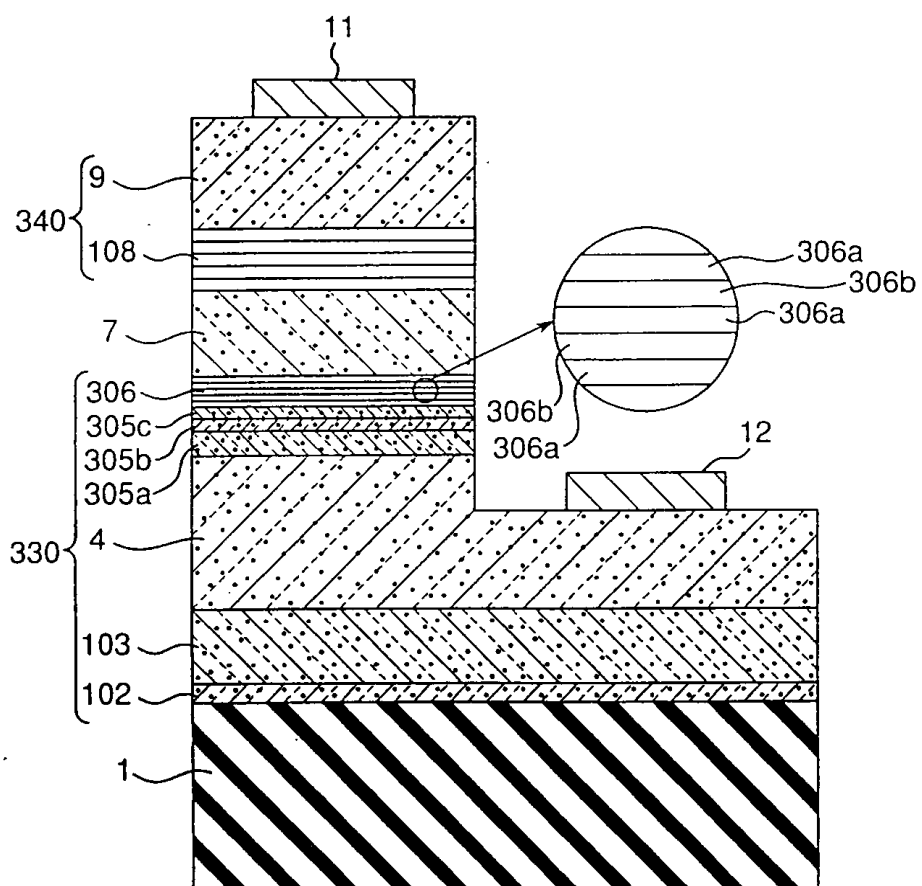


図8



8/10

図9A

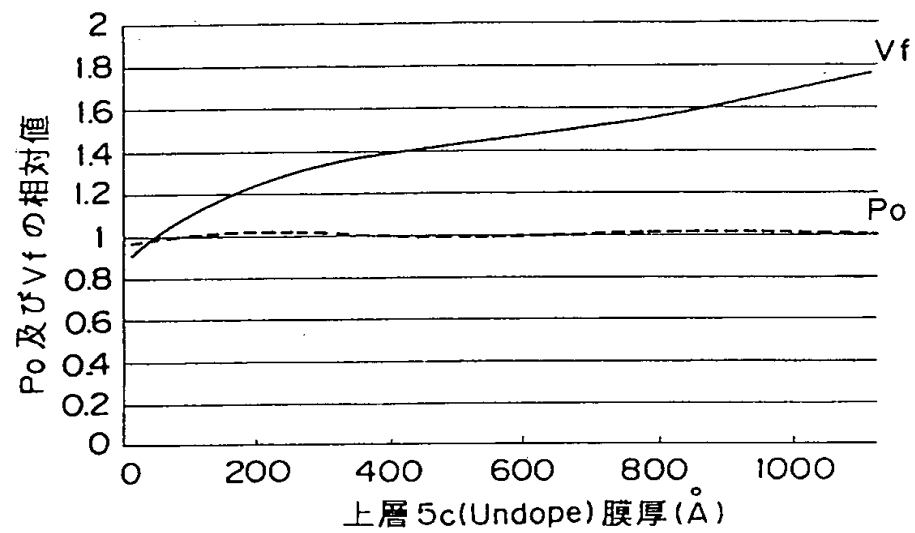


図9B

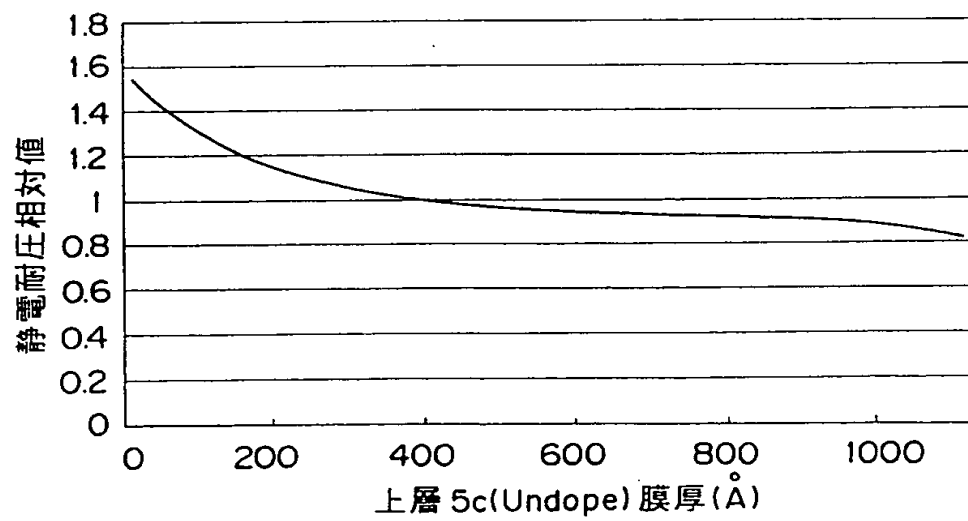


図10A

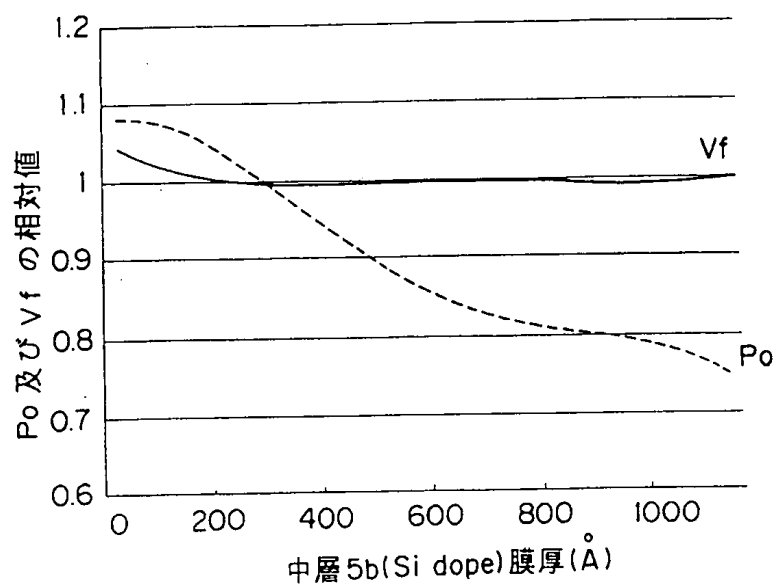
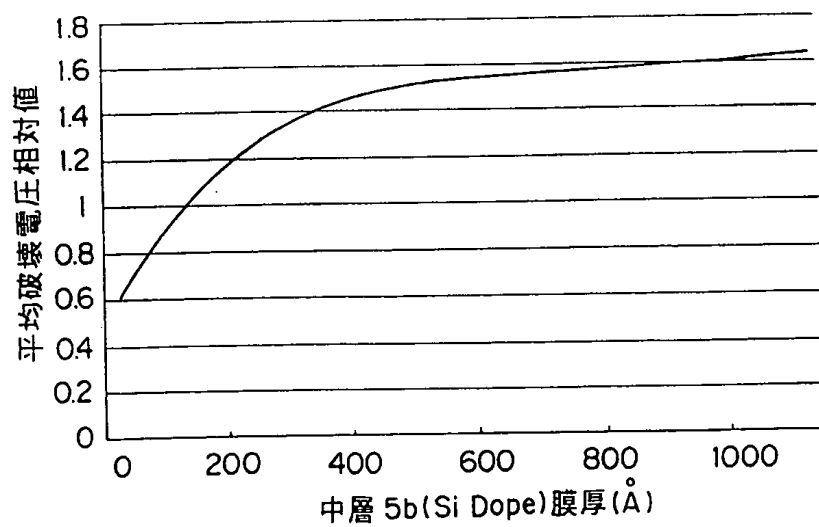


図10B



10/10

図11A

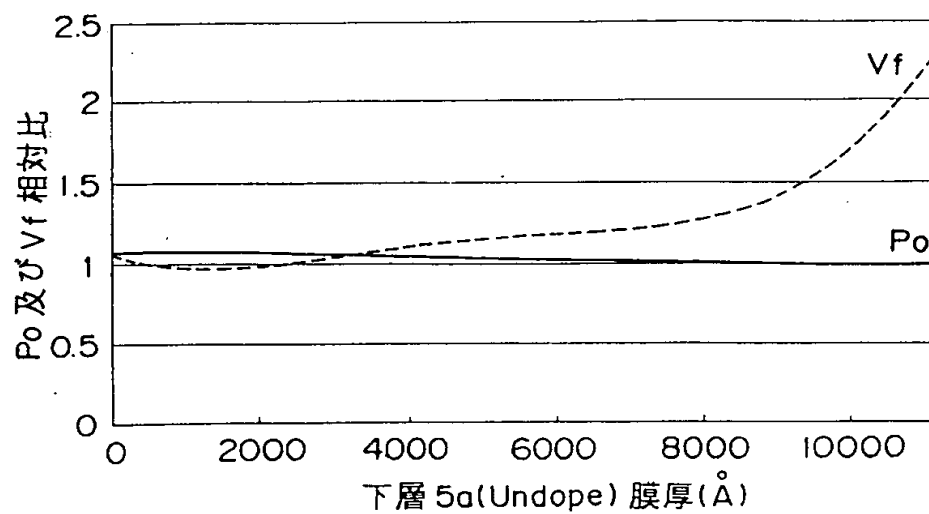
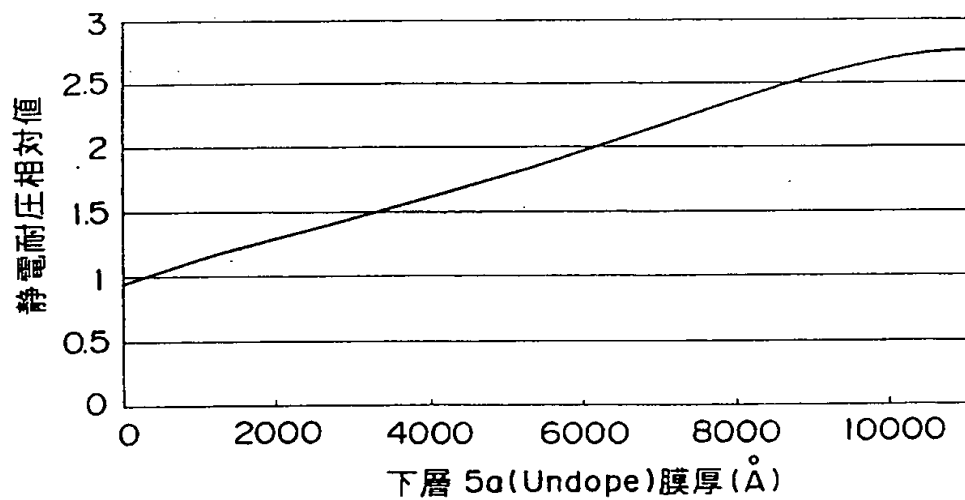


図11B



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP99/01140

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁶ H01L33/00, H01S3/18

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁶ H01L33/00, H01S3/18

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1940-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-1999
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-1999 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-1999

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP, 07-249795, A (Toshiba Corp.), 26 September, 1995 (26. 09. 95), Full text ; Figs. 1 to 10 & US, 5656832, A	1-52
A	JP, 08-330629, A (Nichia Chemical Industries, Ltd.), 13 December, 1996 (13. 12. 96), Full text ; Figs. 1 to 3 (Family: none)	1-52

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
--	---

Date of the actual completion of the international search
7 June, 1999 (07. 06. 99)

Date of mailing of the international search report
15 June, 1999 (15. 06. 99)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

国際調査報告

国際出願番号 PCT/J P 99/01140

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))		
Int. Cl. ⁸ H01L 33/00, H01S 3/18		
B. 調査を行った分野		
調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))		
Int. Cl. ⁸ H01L 33/00, H01S 3/18		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1940-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-1999年 日本国登録実用新案公報 1994-1999年 日本国実用新案登録公報 1996-1999年		
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP, 07-249795, A (株式会社東芝) 26. 9月. 1995 (26. 09. 95) 全文, 第1-10図 & US, 5656832, A	1-52
A	JP, 08-330629, A (日亜化学工業株式会社) 13. 12月. 1996 (13. 12. 96) 全文, 第1-3図 (ファミリーなし)	1-52
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 07. 06. 99		国際調査報告の発送日 15.06.99
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 福島 浩司 印 電話番号 03-3581-1101 内線 3254

THIS PAGE BLANK (user10)